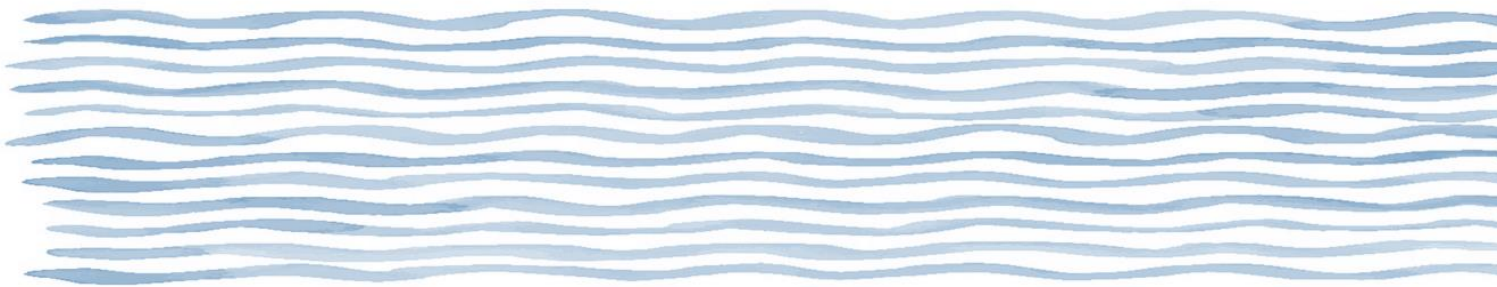


NEUE HYDROLOGISCHE SZENARIEN FÜR DIE SCHWEIZ

R. MÜLCHI, O. RÖSSLER, J. SCHWANBECK, R. WEINGARTNER, O. MARTIUS



IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR UMWELT BAFU – DEZEMBER 2020

EIN FORSCHUNGSPROJEKT IM RAHMEN DES NCCS THEMENSCHWERPUNKTES
“HYDROLOGISCHE GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL” DES NATIONAL CENTRE FOR
CLIMATE SERVICES

Auftraggeber:	Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Auftragnehmer:	Universität Bern, Geographisches Institut, Hallerstrasse 12, 3012 Bern
Autoren:	Regula Mülchi, Ole Rössler, Jan Schwanbeck, Rolf Weingartner, Olivia Martius
Begleitung BAFU:	Petra Schmockler-Fackel, Fabia Hüsler
Hinweis:	Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.
Zitiervorschlag:	Muelchi R., Roessler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2020. Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, 51 S., doi: 10.7892/boris.148715.
DOI:	10.7892/boris.148715

ZUSAMMENFASSUNG

Die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussregime ist für die Anpassungs- und Mitigationsplanung unerlässlich. Veränderte Abflussregime und damit veränderte saisonale Muster der Wasserverfügbarkeit haben einen starken Einfluss auf verschiedene Sektoren wie zum Beispiel die Landwirtschaft, die Energieproduktion oder die Fischerei. Im Rahmen von Hydro-CH2018 wurden daher neue hydrologische Szenarien für die Schweiz erstellt und ausgewertet. Die Szenarien enthalten täglich aufgelöste Abflusssimulationen für die Periode 1981-2099. Insgesamt wurden 93 kleinere und mittlere Einzugsgebiete verteilt über die ganze Schweiz berücksichtigt. Das prozessorientierte hydrologische Modell PREVAH wurde für jedes dieser 93 Einzugsgebiete neu kalibriert und validiert und anschliessend wurden die Abflüsse unter den neuen Schweizer Klimaszenarien CH2018 simuliert. Die Simulationen basieren auf Klimamodellketten für die drei Emissionsszenarien konsequenter Klimaschutz (RCP2.6), begrenzter Klimaschutz (RCP4.5) und ohne Klimaschutz (RCP8.5).

Die Szenarien bestätigen grösstenteils die bisherigen Studien, wonach es zu Veränderungen der saisonalen Muster mit zunehmendem Abfluss im Winter und abnehmendem Abfluss im Sommer und Herbst kommt. Im Frühling wird der mittlere Abfluss in den hochgelegenen Einzugsgebieten zunehmen und in tiefer gelegenen Einzugsgebieten abnehmen. Trotz der starken Abflusszunahme im Winter und teilweise im Frühling wird der mittlere jährliche Abfluss in den meisten Einzugsgebieten abnehmen. Die Ergebnisse zeigen eine starke Höhenabhängigkeit beim Änderungssignal und dessen Intensität. So sind hochgelegene Einzugsgebiete (über 1500 m ü. M.) aufgrund des starken Einflusses von Schnee und Gletscher im Winter, Frühling und Sommer stärker vom Klimawandel betroffen. Die tiefer gelegenen Gebiete weisen stärkere Auswirkungen im Herbst auf. Die Veränderungen verstärken sich, je höher die Treibhausgasemissionen und somit der Klimawandel ausfallen.

Die Niedrigwasserindikatoren NM7Q und Q347 reagieren je nach Einzugsgebiet unterschiedlich auf den Klimawandel. Die höher gelegenen Einzugsgebiete zeigen eine Zunahme des Niedrigwasserabflusses, während die tiefer gelegenen Einzugsgebieten sinkende Kennwerte zeigen. Die Signale verstärken sich in den meisten Einzugsgebieten mit steigenden Treibhausgasemissionen. Die Veränderungen beim Q347 fallen dabei stärker aus als beim NM7Q. Je nach Einzugsgebiet verschiebt sich auch der Auftretenszeitpunkt des NM7Q in eine andere Jahreszeit.

Die Auswertung bezüglich der zu erwartenden jährlichen Abflussspitzen gestaltet sich schwieriger, da die Abflussspitzen sehr stark der modellinternen Variabilität unterliegen und durch die notwendige Ensemblebildung abgemildert werden. Tendenziell nehmen die Abflussspitzen in vergletscherten oder stark schneebeeinflussten Gebieten ab, da weniger Schmelzwasser vorhanden ist. In den pluvial

geprägten Gebieten ist entweder keine Änderung oder eine leichte Zunahme der jährlichen Abflussspitzen zu verzeichnen.

Die Regimeveränderungen jedes einzelnen Einzugsgebietes für die unterschiedlichen Emissionsszenarien sowie für unterschiedliche Zeiträume können auf den interaktiven Plattformen des Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) sowie des National Center for Climate Services (NCCS) vertieft angeschaut werden.

RÉSUMÉ

L'analyse des impacts du changement climatique sur les régimes d'écoulement est essentielle pour la planification de l'adaptation et de l'atténuation. La modification des régimes d'écoulement et donc des schémas saisonniers de disponibilité de l'eau a une forte incidence sur divers secteurs tels que l'agriculture, la production d'énergie ou la pêche. De nouveaux scénarios hydrologiques pour la Suisse ont donc été développés et évalués dans le cadre d'Hydro-CH2018. Les scénarios contiennent des simulations de débit journalier pour la période 1981-2099. 93 bassins versants de petite et moyenne taille répartis dans toute la Suisse ont été pris en compte. Le modèle hydrologique orienté processus PREVAH a été recalibré et validé pour chacun de ces 93 bassins versants, puis le débit a été simulé dans le cadre des nouveaux scénarios climatiques suisses CH2018. Les simulations sont basées sur des chaînes de modèles climatiques pour les trois scénarios d'émissions : protection climatique consécutive (RCP2.6), protection climatique limitée (RCP4.5) et aucune protection climatique (RCP8.5).

Les scénarios confirment largement les études précédentes, selon lesquelles il y a des changements dans les schémas saisonniers avec une augmentation du débit en hiver et une diminution du débit en été et en automne. Au printemps, le débit moyen augmentera dans les bassins versants élevés et diminuera dans les bassins versants à plus basse altitude. Malgré la forte augmentation du débit en hiver et en partie au printemps, le débit annuel moyen diminuera dans la plupart des bassins versants. Les résultats montrent une forte dépendance du changement de signal et de son intensité avec l'altitude. Par exemple, les bassins versants de haute altitude (au-dessus de 1500 m d'altitude) sont plus touchés par le changement climatique en raison de la forte influence de la neige et des glaciers en hiver, au printemps et en été. Les zones de basse altitude présentent des effets plus importants en automne. Plus les émissions de gaz à effet de serre sont élevées et donc le changement climatique important, plus les changements s'accroissent.

Les indicateurs de basses eaux NM7Q et Q347 réagissent différemment au changement climatique selon le bassin versant. Les bassins versants élevés montrent une augmentation des faibles écoulements, tandis que les bassins versants de basse altitude présentent des indicateurs en baisse. Dans la plupart des bassins versants, les effets sont amplifiés par l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Les changements pour Q347 sont plus importants que pour NM7Q. Selon le bassin versant, l'occurrence du NM7Q est déplacé vers une autre période de l'année.

L'évaluation de la prévision du pic de débit annuel est plus difficile, car ces derniers sont soumis à la variabilité interne du modèle et sont atténués dans le contexte des ensembles. Les pics de débit ont tendance à diminuer dans les régions glaciaires ou fortement enneigées, car la présence d'eau de fonte est réduite. Dans les régions pluviales, on n'observe pas de changement ou une légère augmentation des pics annuels de débit.

Les changements de régime de chaque bassin versant pour les différents scénarios d'émissions et pour différentes périodes peuvent être visualisés plus en détail sur les plateformes interactives de l'Atlas hydrologique de la Suisse (HADES) et du Centre national pour les services climatologiques (NCCS).

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	2
RÉSUMÉ	4
1 EINLEITUNG	7
2 UNTERSUCHUNGSGEBIETE	9
3 DATENGRUNDLAGE	11
3.1 Gemessene Daten	11
3.2 Klimaszenarien CH2018	11
3.3 Gletscherszenarien	12
3.4 Weitere Datensätze	13
4 METHODEN	14
4.1 Hydrologisches Modell PREVAH	14
4.2 Kalibrierung und Validierung	15
4.3 Simulationen mit CH2018	16
4.3 Analyse der Resultate	17
5 RESULTATE	18
5.1 Veränderungen im saisonalen mittleren Abfluss	18
5.3 Regimeänderungen für ausgewählte Einzugsgebiete	20
5.4 Niedrigwasser	21
5.5 Hochwasser	23
5.6 Vergleich mit anderen Simulationen anhand einzelner Einzugsgebiete	24
6 FAZIT	28
VERÖFFENTLICHUNGEN	29
DANKSAGUNG	29
LITERATUR	30
ANHANG	33

1 EINLEITUNG

Der anthropogene Klimawandel ist eindeutig und beeinflusst den gesamten Wasserkreislauf (IPCC, 2013). Steigende Temperaturen führen zu Änderungen von vielen hydrologisch relevanten Variablen wie Verdunstung, Niederschlagsmengen, Niederschlagsart (Schnee vs. Regen) und Ausdehnung der Gletscher. Solche Änderungen beeinflussen die Abflussbildung in unseren Gewässern – insbesondere die Abflussregime. Abflussregime spiegeln die integrale zeitliche und räumliche Reaktion der hydrologischen Bedingungen innerhalb eines Einzugsgebietes und damit die Wasserverfügbarkeit wider (Weingartner, 2019). Das Verständnis dieser Veränderungen der Abflussregime ist für viele verschiedene Sektoren wie die Landwirtschaft, die Fischerei, die Wasserkraft und den Tourismus von entscheidender Bedeutung.

In der Schweiz wird der Klimawandel starke Auswirkungen auf den Abfluss haben, da viele Einzugsgebiete in der Schweiz empfindlich auf Veränderungen der Lufttemperatur und der Niederschläge reagieren (CH2014-Impacts, 2014). Durch den Klimawandel verursachte Veränderungen in den Abflussregimen der Schweiz wurden bereits in den letzten Jahrzehnten beobachtet (Weingartner, 2019). In den letzten Jahren wurden mehrere Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussregime in der Schweiz durchgeführt (Horton et al., 2006; Koeplin et al., 2012; Koeplin et al., 2014; Addor et al., 2014, Milano et al., 2015). Diese Studien basieren auf älteren Klimamodellen und statistischen Methoden, welche die Variabilität des Klimas nur bedingt wiedergeben. Die neuen Schweizer Klimaszenarien CH2018 (CH2018, 2018) verwenden die aktuellsten Klimamodelle und modernere statistische Nachbearbeitungsmethoden, welche transiente (zeitlich durchgehende) Zeitreihen für die Periode 1981-2099 unter verschiedenen Emissionspfaden (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) ermöglichen. Basierend auf den neuen CH2018-Klimaszenarien sollen im Projekt «Neue Hydrologische Szenarien für die Schweiz» (Hydro-CH2018) die hydrologischen Szenarien für die Schweiz aktualisiert werden. Damit werden die notwendigen Grundlagen für Anpassungsmassnahmen und weiterführende Klimafolgenstudien geschaffen. Im Vergleich zu den alten CH2011-Szenarien können hydrologische Extreme und die Variabilität besser abgebildet werden. Ebenso erlauben die sogenannten transienten Projektionen eine höhere Flexibilität in den Auswertungen.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes ist der Datensatz Hydro-CH2018-Runoff entstanden, welcher Simulationen auf täglicher Basis für den Zeitraum 1981-2099 für insgesamt 93 kleinere und mittlere Einzugsgebiete umfasst. Der Datensatz Hydro-CH2018-Runoff ist frei zugänglich (Muelchi et al., 2020a). Das hydrologische Modell PREVAH wurde für jedes dieser Einzugsgebiete kalibriert und validiert und anschliessend mit den CH2018-Klimaszenarien simuliert. Diese Simulationen wurden eingehend analysiert und ausgewertet. Die Resultate sind Bestandteil des Syntheseberichtes (BAFU, 2021) und werden auf den Plattformen des Hydrologischen Atlas der Schweiz HADES

(www.hydrologischeratlas.ch) und des National Center for Climate Services NCCS (www.nccs.ch) publiziert.

2 UNTERSUCHUNGSGBIETE

In dieser Studie wurden insgesamt 93 kleinere und mittlere Untersuchungsgebiete analysiert (siehe Abbildung 1). Die Einzugsgebiete decken eine grosse Vielfalt an Einzugsgebietscharakteristiken ab: Von hochalpinen vergletscherten Gebieten über schneebeeinflusste alpine Gebiete bis zu mittelländischen und jurassischen Regeneinzugsgebieten sowie südalpinen Gebieten. Die mittlere Gebietsgrösse beträgt 314 km², wobei das kleinste Einzugsgebiet 14 km² und das grösste Einzugsgebiet 1700 km² misst. Ebenfalls wird ein breites Spektrum an Höhenlagen berücksichtigt mit mittleren Gebietshöhen von 476 bis 2700 m ü. M. Die durchschnittliche Gebietshöhe beträgt 1344 m ü. M. Insgesamt sind 22 von 93 Einzugsgebieten vergletschert mit einem Vergletscherungsgrad zwischen 0.2% und 22%. Weitere Informationen zu den verschiedenen Einzugsgebieten und deren Charakteristiken sind in Tabelle A1 im Anhang zu finden.

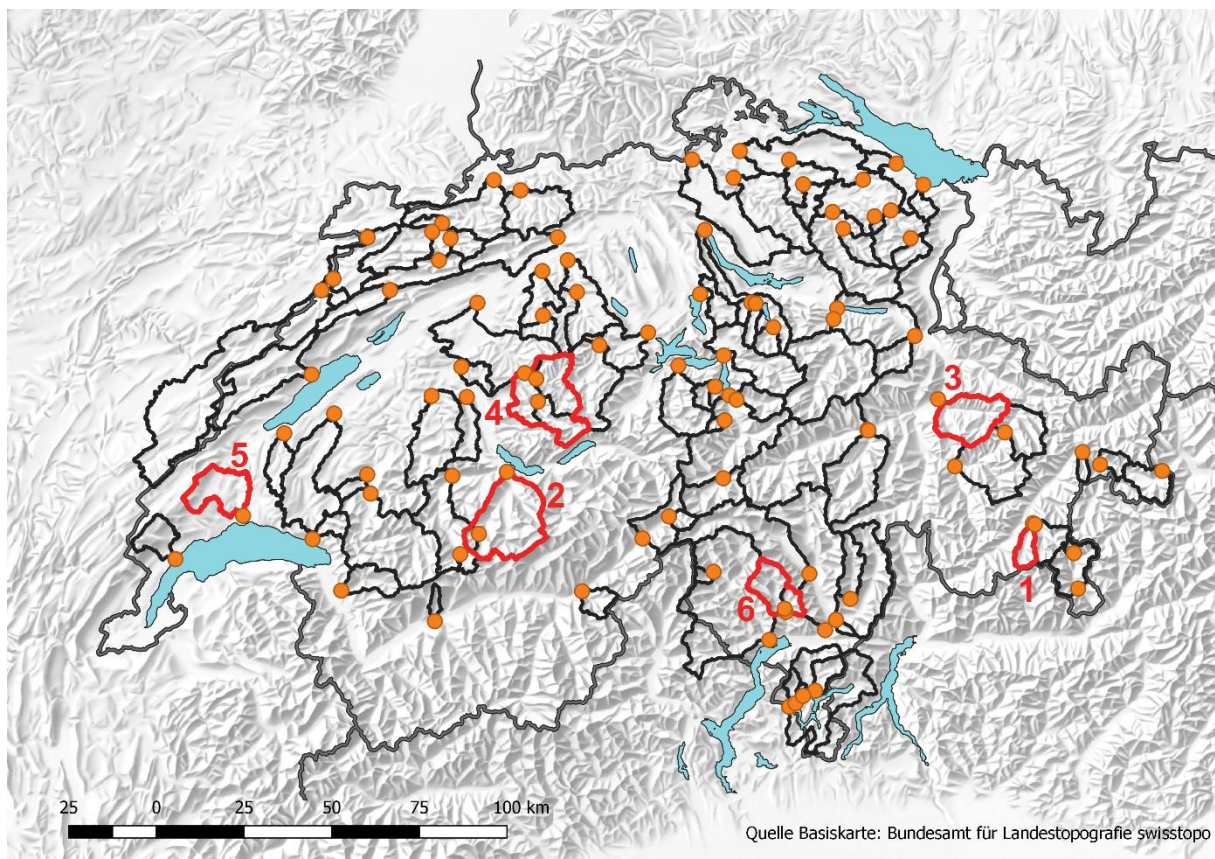


Abbildung 1: Übersicht der 93 analysierten Einzugsgebiete sowie deren Messtationen (orange Punkte). Die repräsentativen Einzugsgebiete sind in rot hervorgehoben: 1 - Rosegbach, 2 - Kander, 3 - Plessur, 4 - Emme, 5 - Venoge, 6 - Verzasca.

Die Auswahl der Einzugsgebiete basierte auf folgenden Kriterien:

- Qualitätsgeprüfte Messungen von 1984-2016 vorhanden, welche durch das Bundesamt für Umwelt durchgeführt wurden
- Einzugsgebietsgrösse zwischen 10-1700 km²

- Möglichst geringe anthropogene Beeinflussung
- Keine grösseren Seen und keine Stauseen im Einzugsgebiet
- Erfolgreiche Kalibrierung und Validierung (NSE>0.7)

Für die detaillierte Analyse der hydrologischen Änderungen unter Klimawandel wurden sechs Einzugsgebiete ausgewählt, welche als repräsentativ für verschiedene Regimetypen betrachtet werden können (siehe Abbildung 1 sowie Tabelle 1). Neben der Repräsentativität wurde auch eine hohe Modellgüte berücksichtigt (NSE in der Validierungsperiode >0.8).

Tabelle 1: Auswahl repräsentativer Einzugsgebiete und deren Eigenschaften.

Einzugsgebiet	Mittlere Höhe (m ü. M.)	Gebietsgrösse (km²)	Regimetyp	NSE Validierung
Rosegbach – Pontresina	2701	67	Glazial (21.7%)	0.83
Kander – Hondrich	1846	491	Glazial (5.1%)	0.87
Plessur – Chur	1865	264	Nival	0.87
Emme – Emmenmatt	1072	443	Nivo-pluvial	0.82
Venoge – Ecublens	694	228	Pluvial	0.89
Verzasca – Lavertezzo	1663	185	Nivo-pluvial südalpin	0.86

3 DATENGRUNDLAGE

3.1 Gemessene Daten

Als Datengrundlage für die Kalibration wurden die Abflussmessungen am Gebietsausfluss verwendet. Diese Daten wurden vom Bundesamt für Umwelt BAFU erhoben und bereitgestellt (FOEN, 2019). Als meteorologischen Modellinput für die Kalibration wurden die gegitterten Messdatensätze (2x2 km) für Tagesmitteltemperatur (TabsD; Frei, 2014; MeteoSwiss, 2019a) und Tagesniederschlagssumme (RhiresD; Frei and Schär, 1998; MeteoSwiss, 2019b) verwendet. Diese Datensätze haben eine Auflösung von 2 km und wurden vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz zur Verfügung gestellt.

3.2 Klimaszenarien CH2018

Als meteorologischen Input für die Simulationen wurden die neuen Schweizer Klimaszenarien CH2018 (CH2018, 2018) verwendet. Die Szenarien bestehen analog zu den Referenzdaten aus hochaufgelösten, gegitterten (2x2 km) täglichen Temperatur- und Niederschlagsdaten für die Schweiz. Das statistische Verfahren «Quantile Mapping» wurde angewendet um die grob aufgelösten Klimamodellketten (globale und regionale Klimamodelle) zu korrigieren (Fehlerkorrektur) und auf eine hohe räumliche Auflösung zu bringen («Downscaling»).

Insgesamt stehen 68 verfügbare Klimamodellketten zur Auswahl (siehe Tabelle 2). Analog zu den Resultaten der neuen Klimaszenarien wurden für die anschliessende hydrologische Analyse nur 47 Simulationsketten berücksichtigt (in Tabelle 2 schwarz hervorgehoben), da einige Modellketten zwar auf verschiedene räumlichen Auflösungen in den regionalen Klimamodellen basieren, jedoch die gleichen Klimamodellketten verwenden. Diese 47 Klimamodellketten decken drei verschiedene Emissionsszenarien ab:

- Konsequenter Klimaschutz (RCP2.6): globale Erwärmung um weniger als 2°C
- Begrenzter Klimaschutz (RCP4.5): globale Erwärmung um ca. 2.5°C
- Kein Klimaschutz (RCP8.5): globale Erwärmung um ca. 4-5°C

Die Anzahl der Klimamodelle variiert zwischen den Emissionsszenarien. Insgesamt stehen für diese Studie 8 Klimamodelle für RCP2.6, 16 Klimamodelle für RCP4.5 und 20 Klimamodelle für RCP8.5 zur Verfügung.

Die gegitterten Datensätze für Tagesmitteltemperatur und Tagesniederschlagssumme wurden für jedes einzelne Einzugsgebiet separat prozessiert und anschliessend als meteorologischen Input für das hydrologische Modell PREVAH verwendet.

Tabelle 2: Liste mit den verfügbaren Modellketten und deren ursprünglicher Auflösung. Modelle in schwarz wurden für die Statistiken verwendet. Modelle in grau und in Klammern sind zwar erhältlich, wurden aber nicht für die Statistiken in dieser Studie verwendet.

Global Climate Model	Regional Climate Model	RCP8.5		RCP4.5		RCP2.6	
		EUR-11	EUR-44	EUR-11	EUR-44	EUR-11	EUR-44
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E		X		X		
	DMI-HIRLAM5	X	(X)	X	(X)	X	
	CLMcom-CCLM4-8-17	X		X			
	CLMcom-CCLM5-0-6		X				
	SMHI-RCA4	X	(X)	X	(X)	X	(X)
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	X	(X)	X			
	CLMcom-CCLM5-0-6		X				
	ICTP-RegCM4-3						
	KNMI-RACMO22E		X		X		X
	SMHI-RCA4	X	(X)	X	(X)		X
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	X	(X)	X	(X)		
	CLMcom-CCLM5-0-6		X				
	MPI-CSC-REMO2009-1	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
	SMHI-RCA4	X	(X)	X	(X)		X
	MPI-CSC-REMO2009-2	X	(X)	X	(X)	X	(X)
MIROC-MIROC5	CLMcom-CCLM5-0-6		X				
	SMHI-RCA4		X		X		X
CCCma-CanESM2	SMHI-RCA4		X		X		
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	SMHI-RCA4		X		X		
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	X	(X)	X	(X)		
NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4		X		X		X
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	SMHI-RCA4		X		X		

3.3 Gletscherszenarien

Für die Beachtung der dynamischen Änderung der räumlichen Ausdehnung der Gletscher wurden die Gletscherszenarien der ETH Zürich (Zekollari et al., 2019) verwendet. Diese Gletscherszenarien wurden mit den gleichen Klimamodellketten simuliert, wie sie in CH2018 zur Verfügung stehen. Für das hydrologische Modell PREVAH wurden die Gletscherausdehnungen jeweils alle fünf Jahre auf den

simulierten Stand aktualisiert. Damit ist die Konsistenz zwischen den Modellergebnissen gewährleistet.

3.4 Weitere Datensätze

Im Rahmen des Projektes Hydro-CH2018 wurden unterschiedliche Methoden und hydrologische Modelle verwendet. Für einige Einzugsgebiete wurden zeitgleich verschiedene hydrologische Simulationen an den Forschungsinstitutionen Universität Bern, Universität Zürich und Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL durchgeführt. Diese Simulationen wurden anschliessend für einen Vergleich der Resultate verwendet. Die verwendeten Daten sowie die Unterschiede zwischen den Datensätzen werden in Kapitel 5.6 beschrieben und diskutiert.

4 METHODEN

4.1 Hydrologisches Modell PREVAH

Das hydrologische Modell «Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU Model PREVAH» (Viviroli et al., 2009) ist ein räumlich aufgelöstes prozessorientiertes hydrologisches Modell, welches für die Modellierung von Einzugsgebieten mit komplexer Topografie entwickelt wurde. Abbildung 2 zeigt schematisch die Abbildung wichtiger hydrologischer Prozesse als Speicherkaskade im Modell. Die räumliche Diskretisierung erfolgt über sogenannte Hydrotöpfe (Hydrological Response Units, HRU), also Oberflächen mit ähnlicher hydrologischer Reaktion. Für jedes dieser Hydrotöpfe wird die Speicherkaskade simuliert und die jeweils resultierenden Größen (u.a. Abflusskomponenten, Verdunstung, Speicherfüllstände) anschliessend zu einem Gebietsmittelwert zusammengefasst. PREVAH enthält Module zur Simulation aller wichtigen hydrologischen Prozesse, unter anderem für Schneeschmelze, Gletscherschmelze, Verdunstung und Bodenfeuchte. Zur Kalibrierung des Modells PREVAH dienen 13 freie Parameter für nicht vergletscherte Gebiete und 15 freie Parameter für vergletscherte Gebiete (siehe Tabelle A2 im Anhang). Für die Berechnung der potentiellen Verdunstung wurde entsprechend der verfügbaren Daten der Ansatz nach Hamon (1961) gewählt. Diese Methode hat den Vorteil, dass sie temperaturbasiert ist und keine komplexeren Variablen verwendet.

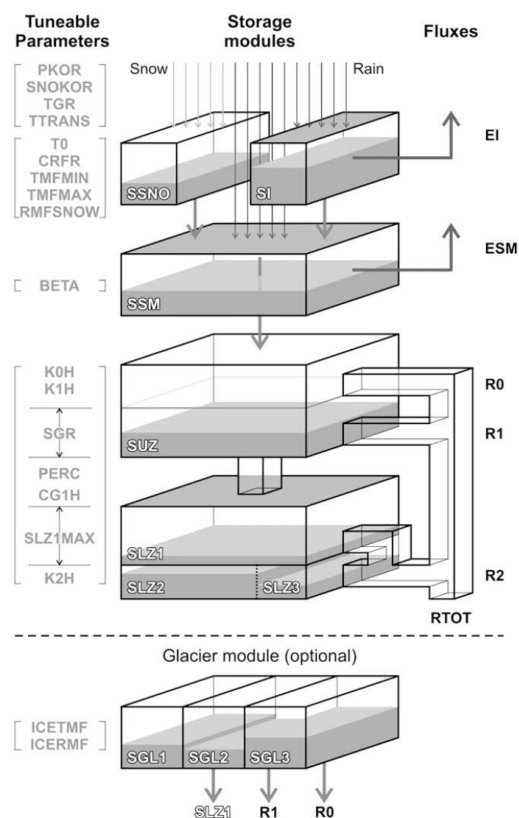


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des hydrologischen Modells PREVAH (aus Viviroli et al., 2009)

4.2 Kalibrierung und Validierung

Für diese Studie wurden 13 Parameter für nicht vergletscherte Gebiete und 15 Parameter für vergletscherte Gebiete kalibriert (Tabelle A2 im Anhang). Für die Kalibrierung des Modells für die unterschiedlichen Einzugsgebiete wurden die Abflussmessungen vom BAFU verwendet. Die meisten Einzugsgebiete wurden für die Periode 1985-2016 kalibriert und validiert. In Einzugsgebieten, welche kürzere Messreihen aufweisen, ist diese Periode etwas kürzer. In der Tabelle A1 im Anhang ist die Kalibrierungsperiode für jedes Einzugsgebiet ersichtlich. Die Kalibration wurde auf den geraden Jahren dieser Periode durchgeführt und die anschliessende Validation auf den ungeraden Jahren. Dadurch wird verhindert, dass zufällige und nicht zufällige Trends die Kalibration zu stark beeinflussen. Die Kalibration wurde mit einem externen Algorithmus (PEST; Doherty, 2005) durchgeführt. Als Bedingung einer erfolgreichen Kalibration wurde nicht nur der gemessene Abfluss verwendet, sondern auch der transformierte (invertiert) Abfluss um ein stärkeres Gewicht auf niedrige Abflussmengen zu legen sowie das Abflussregime und das jährliche Abflussvolumen für die allgemeine Abbildung der Hydrologie im jeweiligen Einzugsgebiet.

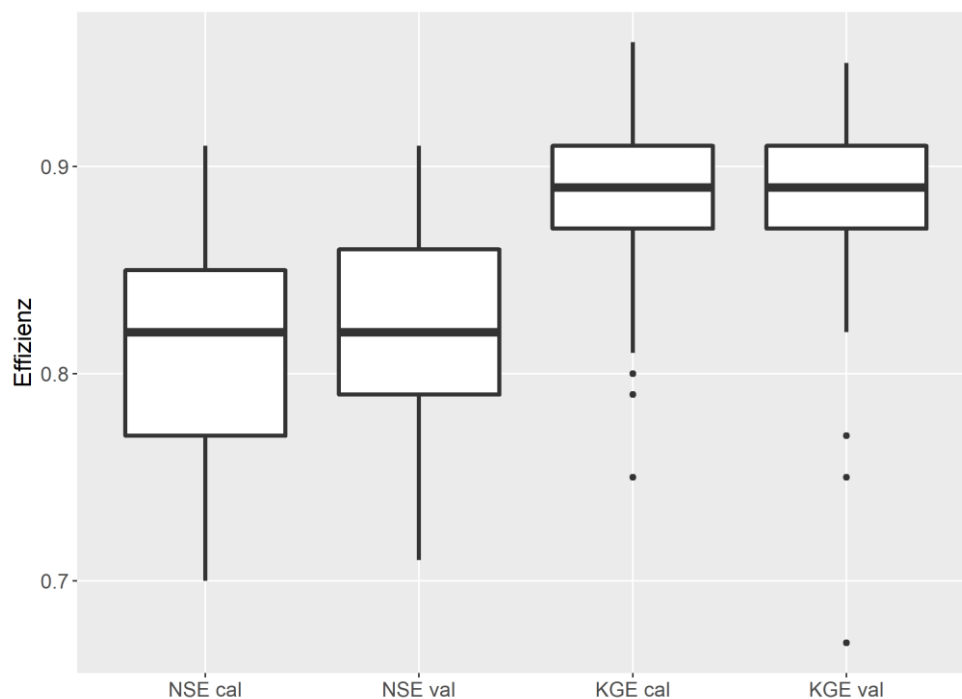


Abbildung 3: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) und Kling-Gupta-Efficiency (KGE) aller 93 verwendeten Einzugsgebiete als Indikator der Modellgüte für die Kalibrierungsperiode (cal) und die Validierungsperiode (val). Abbildung nach Muelchi et al. (2020b).

Für die Einschätzung der Modellgüte wurden die zwei Gütemasse Nash-Sutcliffe Efficiency NSE (Nash und Sutcliffe, 1970) und Kling-Gupta Efficiency KGE (Gupta et al., 2009) verwendet. Die beiden Masse messen die Abweichungen zwischen beobachtetem und simuliertem Abfluss. Je höher das Gütemass,

umso höher die Modellgüte, wobei ein Gütemass von 1 einem perfekten Modell entspricht. Einzugsgebiete mit einem NSE in der Validierungsperiode höher als 0.7 wurden beibehalten. In Abbildung 3 ist die Modellgüte über alle Einzugsgebiete für den NSE in der Kalibrierungs- und Validierungsperiode dargestellt. Ebenfalls ist das Modellgütemass Kling-Gupta-Efficiency abgebildet, welches ein stärkeres Gewicht auf die korrekte Abbildung der Korrelation und Variabilität des Abflusses legt. Der NSE Median über alle 93 Einzugsgebiete für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode liegt bei 0.82 und der KGE Median bei 0.89. Die Werte zeigen eine hohe Modellgüte für die betrachteten Einzugsgebiete. Ausserdem wurde auf eine gute Repräsentation der Abflussregime geachtet (Abbildung 4 für die repräsentativen Gebiete). Weitere Informationen zu den Kalibrierungs- und Validierungsergebnissen sind in Muelchi et al. (2020b) zu finden.

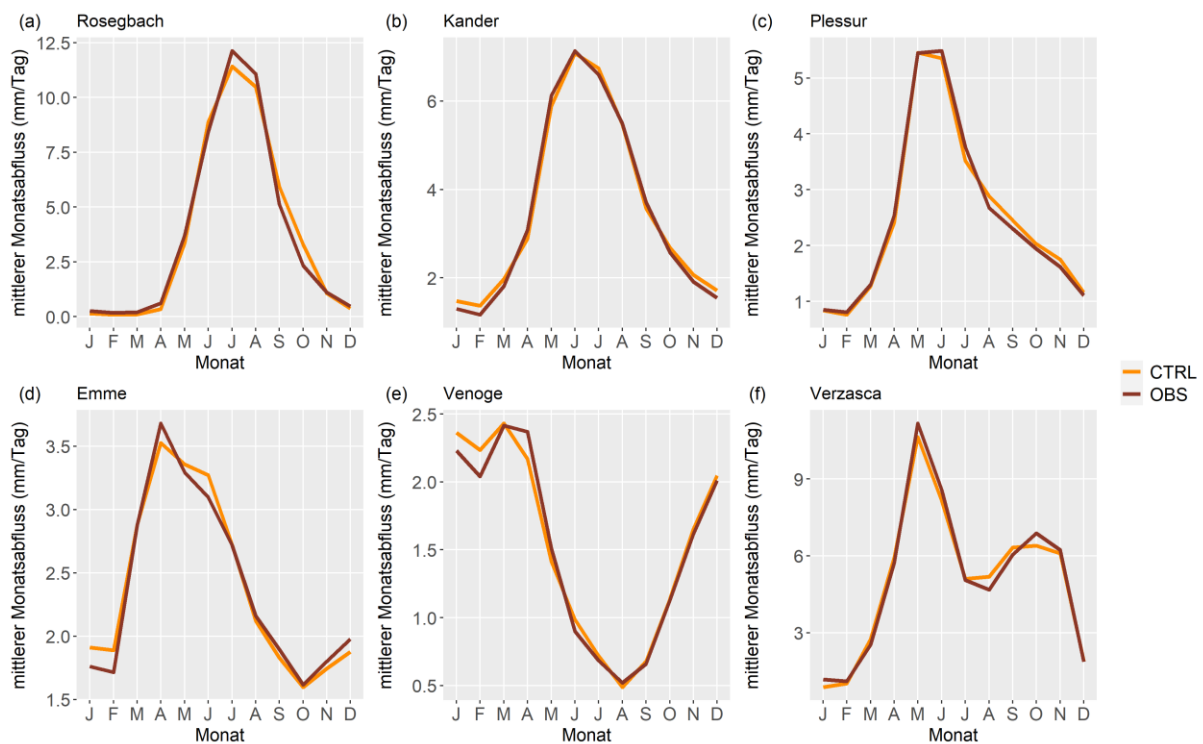


Abbildung 4: Regimekurven für die Periode 1985-2014 der gemessenen Daten (OBS, rot) und der simulierten Daten (CTRL, orange) für die Beispieleinzugsgebiete Rosegbach (a), Kander (b), Plessur (c), Emme (d), Venoge (e), Verzasca (f). Abbildung nach Muelchi et al. (2020b).

4.3 Simulationen mit CH2018

Jedes Einzugsgebiet wurde separat mit jeder einzelnen CH2018-Klimasimulation für 1981-2099 unter Verwendung täglicher Eingabedaten simuliert. Um die Modellspeicher aufzufüllen und gleiche Anfangsbedingungen zu erhalten, ging jeder Modellsimulation ein 10-jähriger Spin-up von 1971-1980 voraus. Für diesen Spin-up wurden die gemessenen Gitterdatensätze RhiresD und TabsD verwendet. Während des gesamten Simulationszeitraums wurde die für jede HRU definierte Landnutzung konstant

gehalten, mit Ausnahme der vergletscherten Einzugsgebiete, bei denen die Gletscherausdehnung alle fünf Jahre aktualisiert wurde. Wenn der Gletscher in einer HRU verschwindet, wurde die Landnutzung der entsprechenden HRU unter 3000 m ü. M. in Rohboden (spärliche Vegetation, tiefe Albedo und geringe Wurzeltiefe) umgewandelt, während die Landnutzung der HRU über 3000 m ü. M. in Fels umgewandelt wurde.

4.3 Analyse der Resultate

Für die Analyse der Abflussänderungen unter den verschiedenen Emissionsszenarien wurde der Fokus auf verschiedene hydrologische Charakteristiken gelegt. Einerseits wurden die saisonalen Änderungen sowie Abflussregimeänderungen angeschaut. Es werden aber auch Aussagen zu Niedrigwasser und moderaten Hochwassern gemacht. Beim Niedrigwasser wurden die jährlichen Abflusswerte des niedrigsten mittleren Abflusses über sieben Tage (NM7Q) sowie der Indikator Q347 verwendet. Ebenfalls wurde die Veränderung des Auftretenszeitpunktes (Saisonalität) vom NM7Q angeschaut. Für Hochwasser wurde der maximale jährliche Tagesabfluss sowie dessen Auftretenszeitpunkt verwendet.

Alle Aussagen basieren jeweils auf dem 30-jährigen Mittel über eine bestimmte Periode. Dabei wird jeweils der zentrierte Mittelwert für die Aussage verwendet. Für eine Aussage für das Jahr 2085 wird zum Beispiel der Mittelwert über den Zeitraum 2070-2099 gebraucht. Je nach Analyse wurde entweder nur der Multimodellmedian verwendet oder das ganze Spektrum der Klimamodelle abgebildet. Dies erlaubt eine Abschätzung der Robustheit der Aussagen bezüglich der Klimaszenarien. In diesem Bericht wurde der Fokus auf die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 sowie auf den Zeitraum bis 2085 gelegt. Weitere Resultate für andere Zeiträume sowie das Emissionsszenario RCP4.5 können im Anhang oder auf der Webseite des NCCS oder HADES angeschaut und heruntergeladen werden.

5 RESULTATE

Viele der Resultate aus diesem Projekt wurden im Synthesebericht (BAFU, 2021) aufgenommen und ausführlich diskutiert. In diesem Kapitel werden daher nur die wichtigsten Resultate zusammengefasst. Weitere Grafiken zu den verschiedenen Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) sowie für mittlere (2060, 2045-2074) und ferne Zukunft (2085, 2070-2099) sind im Anhang zu finden (Abbildungen A1-A16).

5.1 Veränderungen im saisonalen mittleren Abfluss

In Abbildung 5 sind die prozentualen Änderungen des 30-jährigen Mittels für das Jahr 2085 gegenüber der Referenzperiode für die verschiedenen Jahreszeiten dargestellt. Diese Abbildung zeigt die Resultate unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5).

Allgemein kann man festhalten, dass sich ohne Klimaschutz der Winterabfluss stark erhöht – in einigen alpinen Einzugsgebieten um mehr als das Doppelte. Dies kann durch die Kombination von erhöhtem Winterniederschlag und höheren Temperaturen erklärt werden. Die höheren Temperaturen führen dazu, dass der Niederschlag öfter in Form von Regen als in Form von Schnee fällt und somit nicht als Schnee gespeichert wird und direkt abfließt.

Im Frühling ist das Änderungssignal für den mittleren Abfluss je nach Lage des Einzugsgebietes unterschiedlich. Die höher gelegenen Einzugsgebiete zeigen eine deutliche Zunahme des Abflusses, was vor allem durch die erhöhte Schneeschmelze in Gebieten, wo die Schneeschmelze in der Referenzperiode erst gegen Anfang Sommer beginnt, erklärt werden kann. In den tiefer gelegenen Einzugsgebieten nimmt der mittlere Abfluss im Frühling tendenziell ab. Diese Abnahme beträgt je nach Einzugsgebiet bis zu 21%.

Der mittlere Sommerabfluss wird bis 2085 deutlich abnehmen. Die Abnahme beträgt je nach Einzugsgebiet zwischen 16-59%. Insbesondere die hoch gelegenen Einzugsgebiete, bei welchen die Gletscher mehrheitlich abgeschmolzen sind, reagieren besonders stark mit einer Halbierung des mittleren Abflusses. Die Abnahme im Sommer kann durch die verringerten Sommerniederschläge sowie erhöhter Verdunstung erklärt werden. Auch die verringerte und teils auch nicht vorhandene Gletscherschmelze Ende Sommer trägt zu der Abnahme des Sommerabflusses bei.

Ebenfalls eine Abnahme zeigt der mittlere Herbstabfluss. Vor allem tiefer gelegene Gebiete zeigen eine starke Verminderung des Abflusses. Obwohl die prozentualen Zunahmen im Winter und teils auch im Frühling sehr stark sind, weist der mittlere Jahresabfluss in den meisten Gebieten eine leichte

Abnahme auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Abnahme im Sommer und Herbst die Zunahme im Winterhalbjahr ausgleicht resp. in den meisten Einzugsgebieten sogar übertrifft.

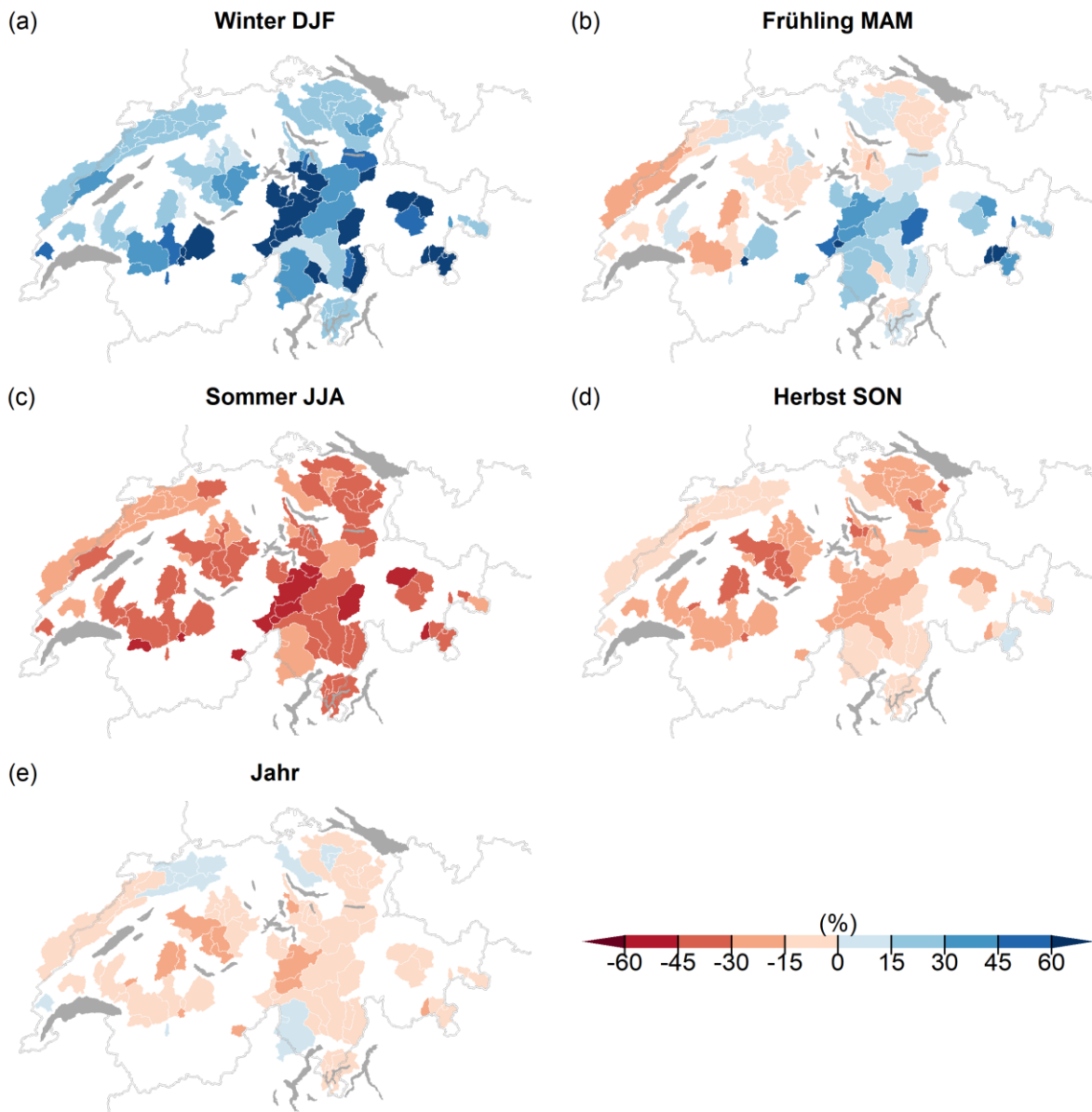


Abbildung 5: Prozentuale Veränderung des mittleren saisonalen und jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2070-2099 gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios ohne Klimaschutz (RCP8.5) für Winter (a), Frühling (b), Sommer (c), Herbst (d) und das ganze Jahr (e) ab. Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

Abbildung 6 zeigt ebenfalls die prozentuale Veränderung des mittleren saisonalen Abflusses bis 2085 gegenüber der Referenzperiode, jedoch unter der Annahme, dass konsequente Klimaschutzmassnahmen umgesetzt werden. Die Richtung des Klimasignals (Zunahme oder Abnahme) ist in den meisten Fällen gleich wie unter dem Emissionsszenario ohne Klimaschutz. Jedoch sind die Magnituden der Änderungen deutlich geringer. Somit können selbst mit konsequentem Klimaschutz nicht alle Änderungen vermieden werden, aber deren Magnitude kann deutlich verkleinert werden.

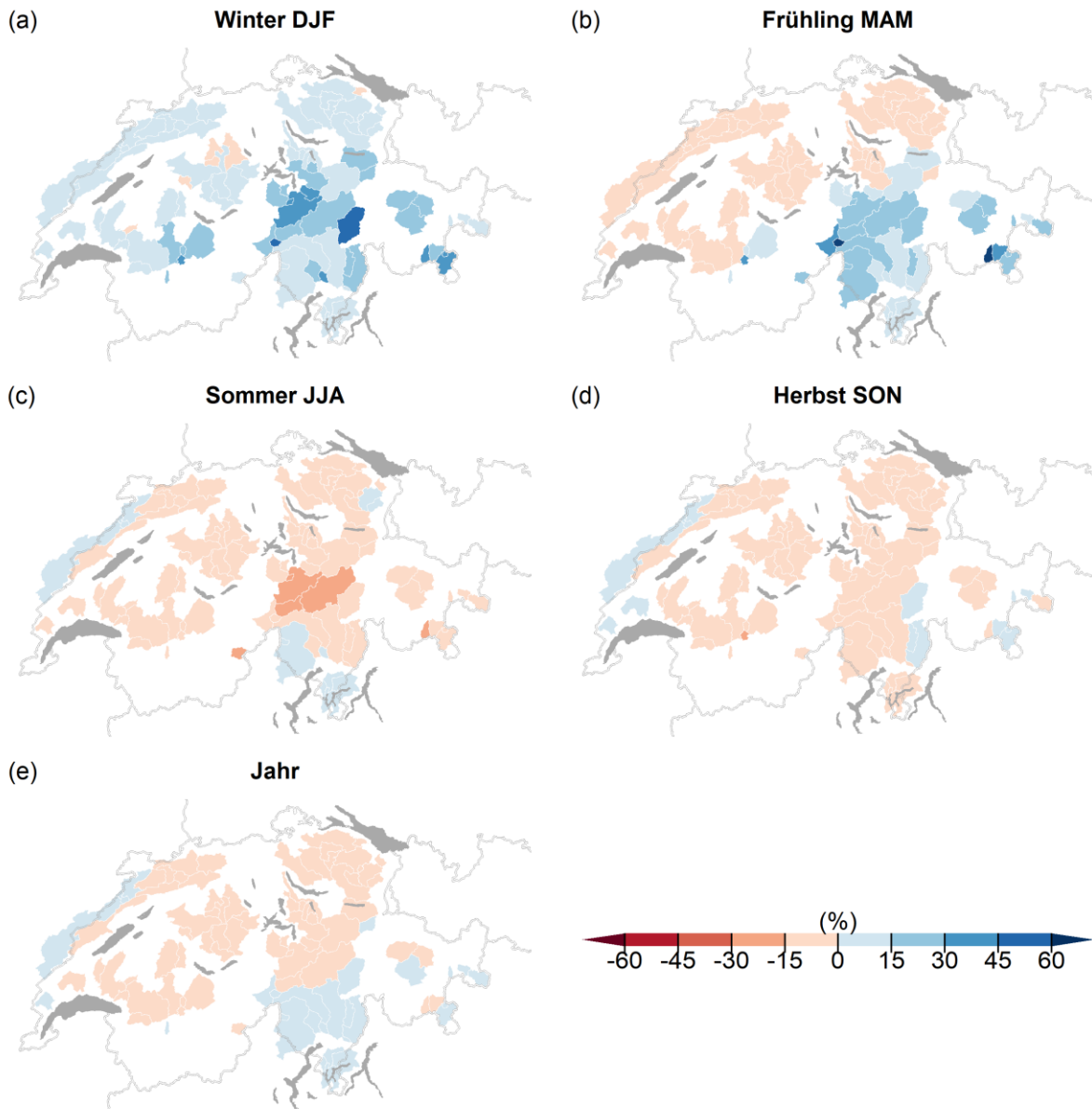


Abbildung 6: Prozentuale Veränderung des mittleren saisonalen und jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2070-2099 gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios mit Klimaschutz (RCP2.6) für Winter (a), Frühling (b), Sommer (c), Herbst (d) und das ganze Jahr (e) ab. Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

5.3 Regimeänderungen für ausgewählte Einzugsgebiete

Abbildung 7 zeigt die Abflussregimes der sechs repräsentativen Einzugsgebiete für die Referenzperiode sowie für das Jahr 2085 unter einem Szenario ohne Klimaschutz und einem Szenario mit konsequentem Klimaschutz. Wie bereits im vorangehenden Kapitel erwähnt, nimmt der Abfluss im Winter zu und im Sommer sowie im Herbst ab. In dieser Abbildung wird die Bedeutung der Änderungen sichtbar, insbesondere die starke Abnahme des Sommerabflusses in hoch gelegenen Einzugsgebieten. In den alpinen Gebieten wird die Regimekurve tendenziell ausgeglichener. Die Abflussregimespitze

verringert sich und verschiebt sich um etwa einen Monat früher im Jahr, zudem nimmt der winterliche Abfluss zu. Im Mittelland hingegen wird die Regimekurve akzentuierter, mit einem deutlicheren Sommerminimum gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Die Änderungen im Abflussregime fallen deutlich schwächer aus im Szenario mit konsequentem Klimaschutz.

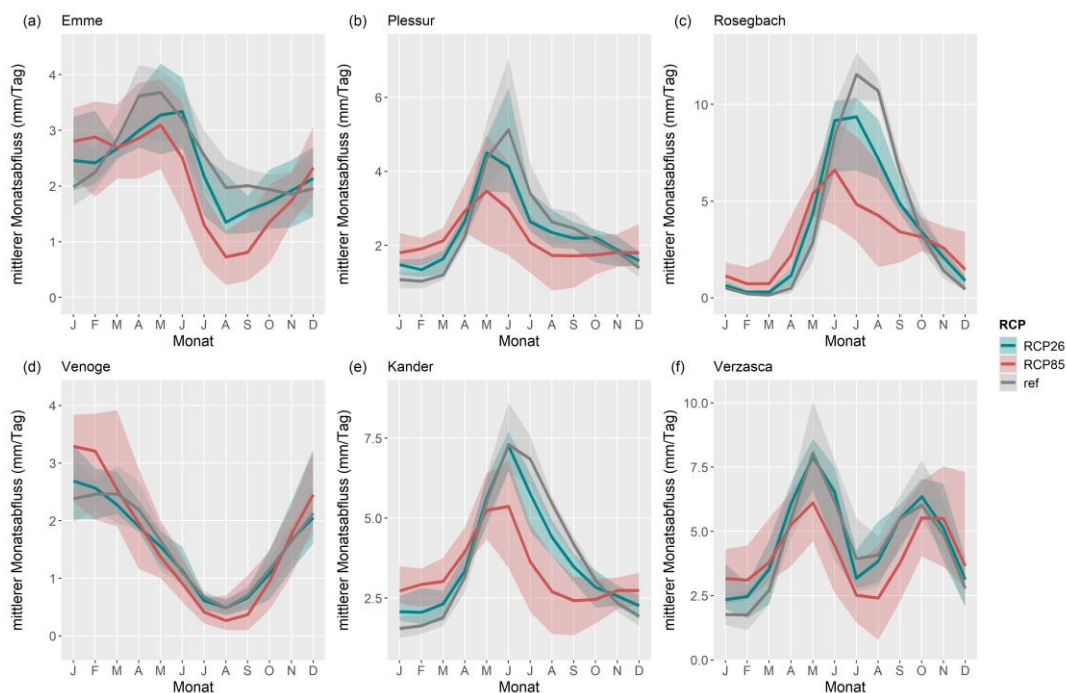


Abbildung 7: Abflussregime der repräsentativen Einzugsgebiete Rosegbach (a), Kander (b), Plessur (c), Emme (d), Venoge (e) und Verzasca (f) in der Referenzperiode (ref, grau) und für die Periode 2070-2099 mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6, türkis) und ohne Klimaschutz (RCP8.5, rot). Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum). Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

5.4 Niedrigwasser

Für die Analyse des Niedrigwassers wurden die Indikatoren NM7Q und Q347 verwendet. Abbildung 8 und 9 verdeutlichen die räumliche Verteilung der prozentualen Veränderung von NM7Q und Q347 bis 2085 für den Multimodellmedian unter verschiedenen Emissionsszenarien. Die beiden Niedrigwasserindikatoren reagieren je nach Einzugsgebiet unterschiedlich auf den Klimawandel. Tendenziell kann festgehalten werden, dass die Abflussmengen während Niedrigwasser in den höher gelegenen Einzugsgebieten zunehmen, während die Abflussmengen in den tiefer gelegenen Einzugsgebieten abnehmen. Die Abnahme der Abflussmenge während Niedrigwasser in den tiefer gelegenen Gebieten beträgt bis zu -60% - folglich mehr als eine Halbierung des Abflusses in Niedrigwassersituationen verglichen mit der Referenzperiode. Die Zunahme im hochalpinen Raum kann unter anderem auf die verstärkte Schneeschmelze zurückgeführt werden (siehe auch Abbildung

10). Die Veränderungen verstärken sich in den meisten Einzugsgebieten je höher die Emissionen ausfallen (von RCP2.6 zu RCP8.5).

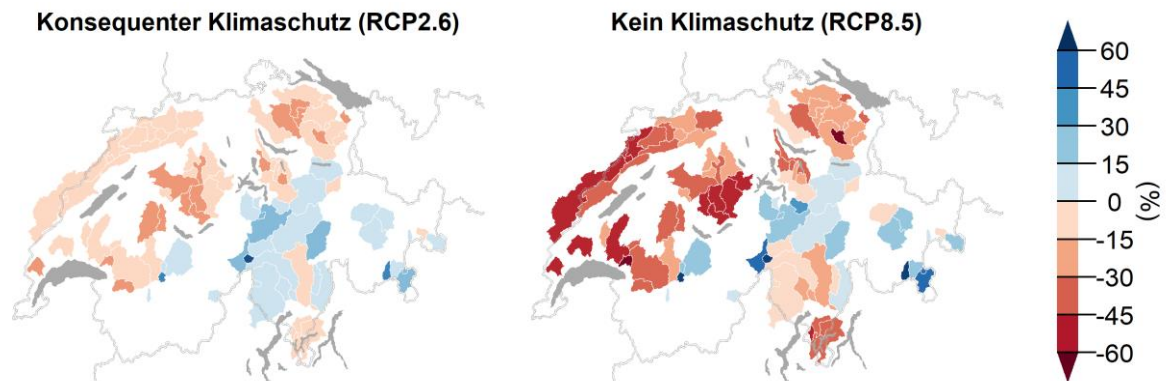


Abbildung 8: Prozentuale Veränderung der Abflussmenge des Niedrigwasserindikators NM7Q in der Periode 2070-2099 gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6) sowie ohne Klimaschutz (RCP8.5) ab. Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).

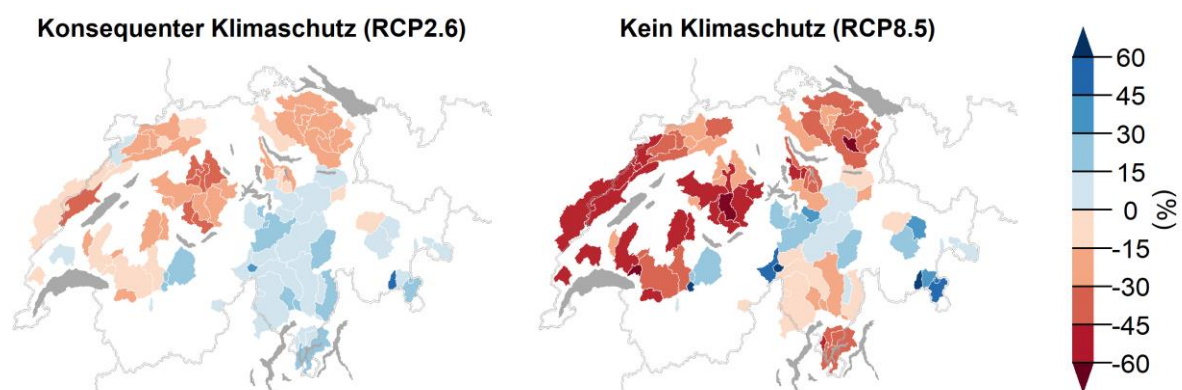


Abbildung 9: Prozentuale Veränderung der Abflussmenge des Niedrigwasserindikators Q347 in der Periode 2070-2099 gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6) sowie ohne Klimaschutz (RCP8.5) ab.

Die Entwicklung des Auftretenszeitpunktes sowie der Abflussmenge des NM7Q bis Ende des Jahrhunderts unter dem Emissionsszenario ohne Klimaschutz für die sechs repräsentativen Einzugsgebiete wird in Abbildung 10 dargestellt. Das stark vergletscherte Einzugsgebiet des Rosegbachs zeigt eine deutliche Zunahme der Abflussmenge des NM7Q, wobei sich der Auftretenszeitpunkt um einen Monat vorverschiebt. Das wenig vergletscherte Einzugsgebiet Kander (5,1 %) zeigt eine leichte Zunahme der Abflussmenge des NM7Q mit einer Verschiebung des Auftretenszeitpunktes vom Winter in den Herbst. Ebenfalls eine Verschiebung des Auftretenszeitpunktes vom Frühling in den Herbst weist das nivale Einzugsgebiet Plessur auf. In den tiefer gelegenen Einzugsgebieten Emme und Venoge zeigen die Simulationen eine deutliche Abnahme

des Niedrigwasserabflusses. Der Auftretenszeitpunkt in der Emme verschiebt sich vom Herbst in den Spätsommer. Im Gegensatz zu den anderen repräsentativen Gebieten verändert sich der Auftretenszeitpunkt in der Venoge kaum. Die Verzasca auf der Südseite der Alpen zeigt eine Verschiebung des Auftretenszeitpunktes vom Frühling in den Spätsommer und Frühherbst. Ebenfalls verringert sich die Abflussmenge während Niedrigwasser – vor allem in den letzten Dekaden des 21. Jahrhunderts.

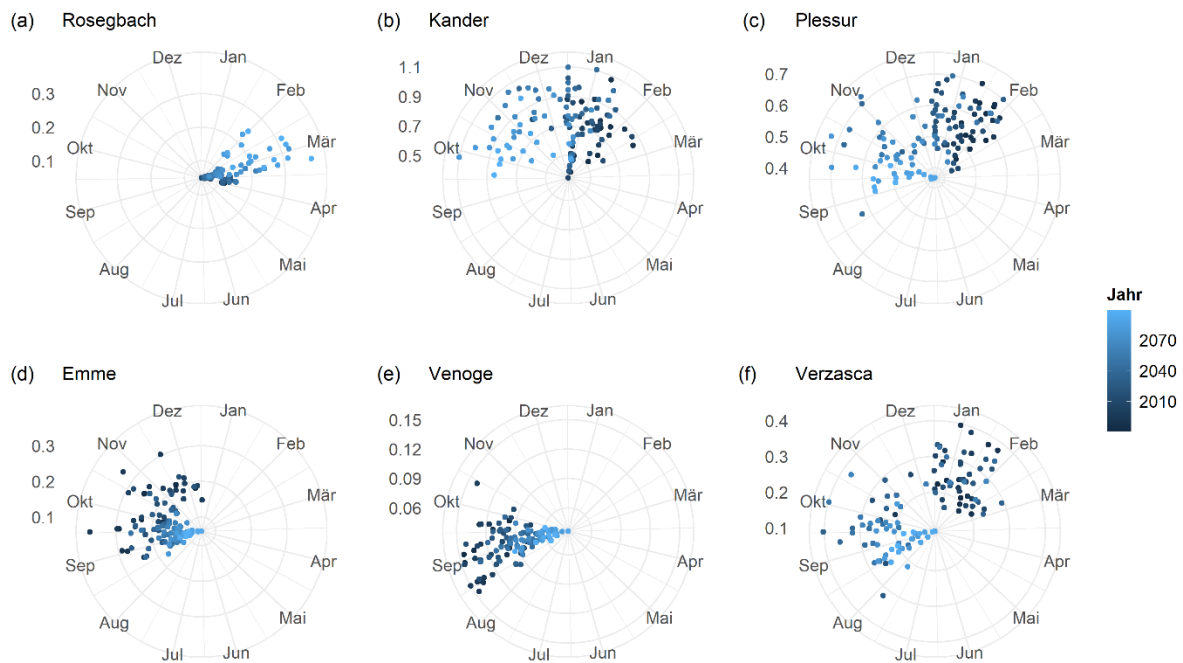


Abbildung 10: Entwicklung der Abflussmenge (Radius, mm/Tag) und des Auftretenszeitpunktes des Niedrigwasserindicators NM7Q für ausgewählte repräsentative Einzugsgebiete Rosegbach(a), Kander (b), Plessur (c), Emme (d), Venoge (e) und Verzasca (f) unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5). Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).

5.5 Hochwasser

Aussagen im Bereich Hochwasser sind schwierig, da Hochwasser seltene und extreme Ereignisse sind. Für jedes Einzugsgebiet wurden mehrere Simulationen mit verschiedenen Klimamodellläufen durchgeführt. Diese Klimamodellläufe sind unabhängig voneinander. Somit treten extreme Ereignisse nicht unbedingt im gleichen Jahr auf. Für die mittlere Schätzung wird der Median über alle Klimamodelle gezogen. Dies kann dazu führen, dass Signale ausgemittelt und nicht gesehen werden. In diesem Kapitel wird Hochwasser als das jährliche Maximum definiert. Dies bedeutet Hochwasser, welches jedes Jahr erwartet werden muss, was jedoch nicht zwingend ein Hochwasser von grosser Bedeutung heissen muss. In Abbildung 11 wird die Abflussmenge (Radius) sowie der Auftretenszeitpunkt der jährlichen Abflussmaxima für die mittlere Schätzung dargestellt.

Die Jahresmaxima im stark vergletscherten Gebiet Rosegbach treten vorwiegend im Spätsommer auf. Dieser Zeitpunkt wird sich bis Ende des 21. Jahrhunderts tendenziell in den Frühsommer vorverschieben, wobei auch die Abflussmenge während der jährlichen Abflussmaxima abnimmt. Ebenfalls abnehmen wird das jährliche Maxima im nivalen Gebiet Plessur. Jedoch verändert sich der Auftretenszeitpunkt wenig bis gar nicht. Die anderen Repräsentativgebiete weisen kein klares Muster in der Entwicklung des jährlichen maximalen Abflusses auf. Tendenziell nehmen die Abflussspitzen in vergletscherten oder stark schneebeeinflussten Gebieten ab, da weniger Schmelzwasser vorhanden ist. In den pluvialen Gebieten ist entweder keine Änderung oder eine leichte Zunahme zu verzeichnen.

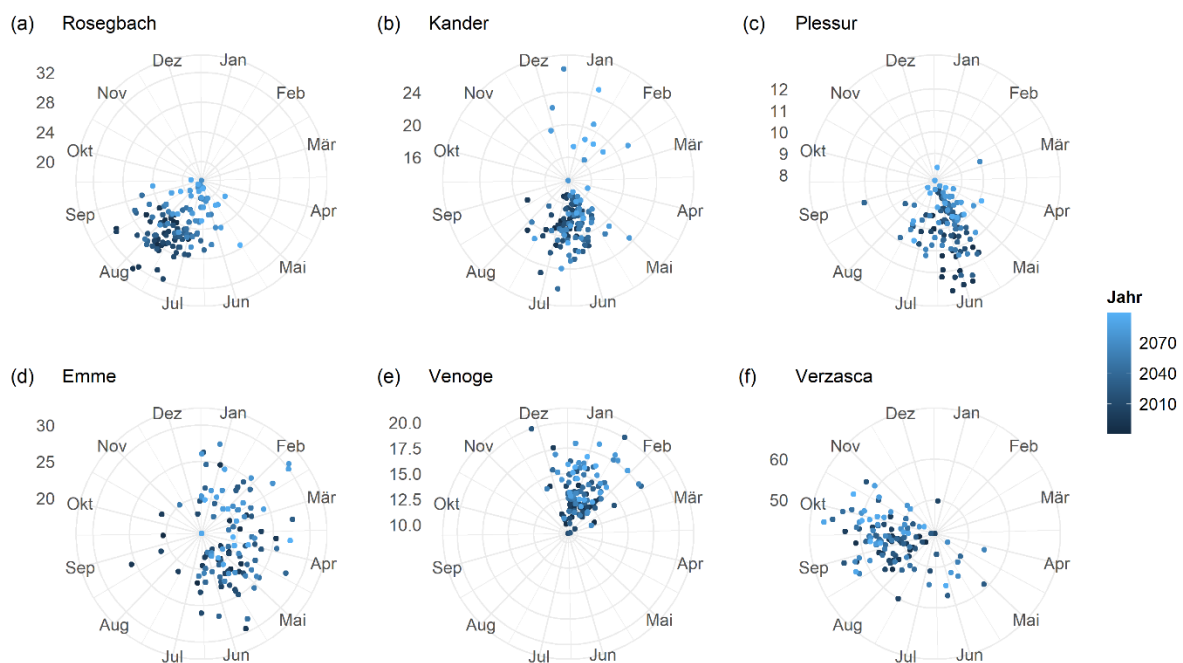


Abbildung 11: Entwicklung der Abflussmenge (Radius, mm/Tag) und des Auftretenszeitpunktes des jährlichen Tagesabflussmaximums für ausgewählte repräsentative Einzugsgebiete Rosegbach(a), Kander (b), Plessur (c), Emme (d), Venoge (e) und Verzasca (f) unter dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5). Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).

5.6 Vergleich mit anderen Simulationen anhand einzelner Einzugsgebiete

Im Rahmen des Projektes Hydro-CH2018 wurden Simulationen von der Universität Bern (UBE), der Universität Zürich (UZH), und der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) durchgeführt. Die Simulationen wurden für unterschiedliche Zwecke mit unterschiedlichen hydrologischen Modellen, Methoden und Eingangsdaten erstellt. Die wichtigsten Unterschiede zwischen den Modellen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Einzelne Einzugsgebiete wurden von verschiedenen Institutionen simuliert und können untereinander verglichen werden. Ein Vergleich zwischen den Simulationen erlaubt eine Abschätzung der Robustheit der jeweiligen Resultate.

Tabelle 3: Verwendete Daten und Methoden der verschiedenen Institutionen.

Institut	Fokus	Hydrologisches Modell	Zeitliche Auflösung	Inputdaten CH2018	Gletscherdaten	Verdunstung
UBE	Abflussregime Meso-skalg	PREVAH	Täglich	Gitterdaten	Zekollari et al. 2019	Hamon
UZH	Schnee und Gletscher	HBV light	Täglich	Gitterdaten	Interne Routine	Hamon
WSL	Wasserbilanz Makro-skalg	PREVAH	Stündlich	Stationsdaten	Zekollari et al. 2019	Penman- Monteith

Insgesamt 26 Einzugsgebiete wurden von der WSL sowie der UBE simuliert und 12 Einzugsgebiete von der UZH und der UBE. Wie in Kapitel 4.2 erwähnt, wurde im Projekt der UBE das hydrologische Modell für jedes Einzugsgebiet einzeln kalibriert. Damit kann eine gute Regimeabdeckung gewährleistet werden. Im Gegensatz zu dieser Methode haben die UZH und WSL ihr hydrologisches Modell für die Einzugsgebiete regionalisiert. Eine Regionalisierung erlaubt auch bei nicht gemessenen Einzugsgebieten eine Abschätzung des Abflusses. Jedoch können die simulierten und beobachteten Regime voneinander abweichen. Für den Vergleich wurde der Fokus daher auf die relativen Änderungen für alle Gebiete gelegt. Für die absoluten Regimeänderungen wurden drei Einzugsgebiete ausgewählt, welche bei allen drei Institutionen eine gute Regimeabdeckung in der Referenzperiode liefern. Da die drei Institutionen mit einer unterschiedlichen Auswahl an Klimamodellen gearbeitet haben, wird der Median aller Klimamodelle, welche von allen drei Institutionen simuliert wurden, verwendet. Eine Liste der entsprechenden Klimamodellketten ist im Anhang (Tabelle A3) zu finden. Aufgrund dieser unterschiedlichen Klimamodellselektion können die Resultate in diesem Kapitel leicht von den Resultaten der vorherigen Kapitel abweichen.

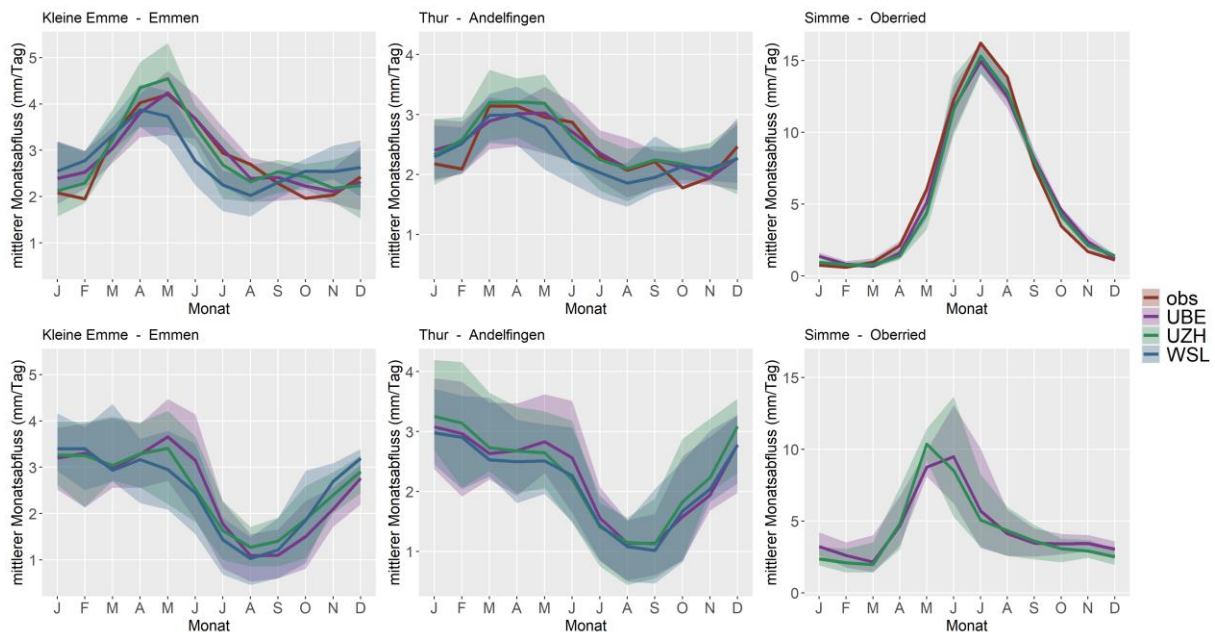


Abbildung 12: Abflussregime der gemessenen Daten (obs, rot), der UBE (violett), der UZH (grün) und der WSL (blau) für die Referenzperiode (oben) und für die Periode 2070-2099 unter RCP8.5 (unten) für die Kleine Emme bei Emmen, die Thur bei Andelfingen und die Simme bei Oberried. Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum).

Die Abbildung 12 zeigt die Resultate von drei ausgewählten Einzugsgebieten: Kleine Emme bei Emmen, Thur bei Andelfingen und Simme bei Oberried. Die Unsicherheitsbänder stellen die Variabilität zwischen den Klimamodellen dar. Diese Unsicherheitsbänder variieren von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet, während die Variabilität der Klimamodelle in der Referenzperiode meist etwas kleiner ausfällt als in der fernen Zukunft. Die Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung der Regimekurven in der Referenzperiode verglichen mit den Messungen. Auch die Regimekurven für das Jahr 2085 (Periode 2070-2099) unter RCP8.5 verlaufen nach ähnlichen Mustern bei den Simulationen der verschiedenen Institutionen. Dies verdeutlicht die Robustheit der neuen hydrologischen Szenarien. Abbildung 13 zeigt die prozentualen Änderungen des saisonalen Abflusses für das Jahr 2085 unter RCP2.6 und RCP8.5 der UBE verglichen mit der WSL und UZH. Je weiter weg sich die Punkte von der Diagonalen befinden, umso grösser die Unterschiede zwischen den Resultaten. Die Unterschiede der prozentualen Änderungen sind in der Regel kleiner bei RCP2.6 als bei RCP8.5, da sich die Änderungen auf tieferem Niveau befinden. Die Unterschiede sind im Winter und Frühling bei den höher gelegenen Gebieten grösser als bei tiefer gelegenen Gebieten. Dies ist durch die unterschiedliche Handhabung der Schneespeicher und -routinen sowie die sehr grossen prozentualen Änderungen erklärbar. Die absoluten Änderungen sind gerade im Winter eher marginal. Im Sommer und im Herbst sind die Unterschiede zwischen den Resultaten tendenziell grösser in den tiefer gelegenen Gebieten. Allgemein kann festgehalten werden, dass die Änderungssignale (Zu- oder Abnahme) bei den verschiedenen Institutionen gleich sind und oft auch ähnliche Muster aufweisen.

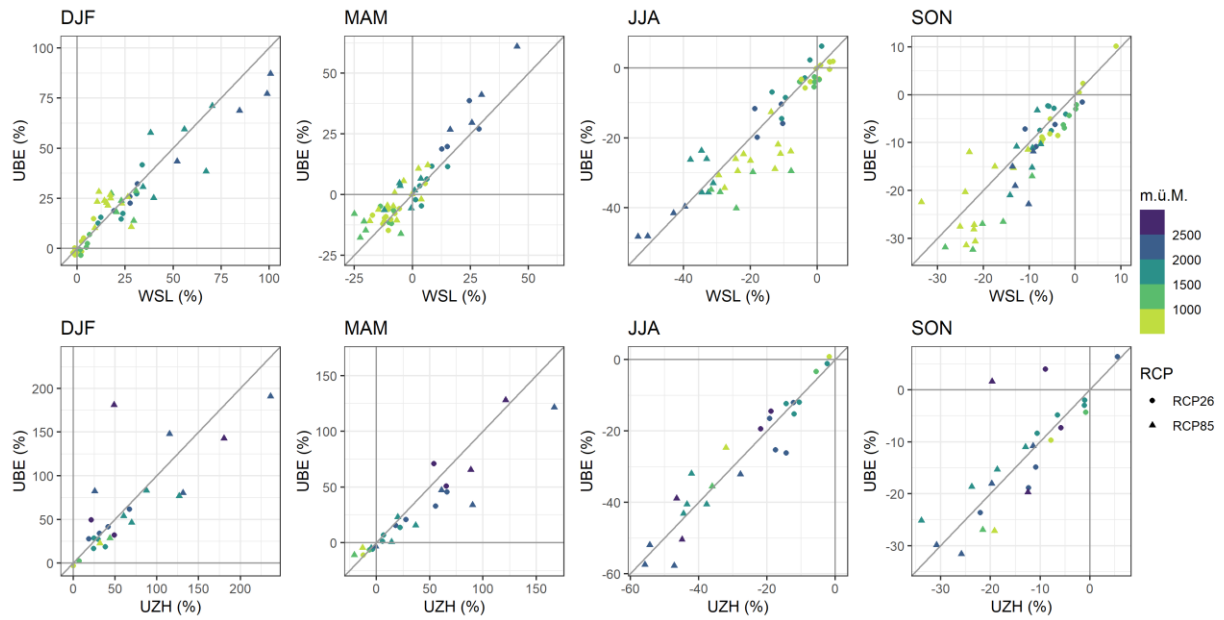


Abbildung 13: Vergleich der prozentualen Änderungen des saisonalen Abflusses bis 2070-2099 für RCP2.6 (Punkte) und RCP8.5 (Dreiecke) zwischen UBE und WSL (oben) sowie UBE und UZH (unten). Die Farbskala zeigt die mittlere Höhe des jeweiligen Einzugsgebietes.

6 FAZIT

Im vorliegenden Projekt «Neue Hydrologische Szenarien für die Schweiz» wurden die hydrologischen Szenarien für die Schweiz aktualisiert und analysiert. Dafür wurde das prozessorientierte hydrologische Modell PREVAH verwendet. Insgesamt 93 kleine und mittlere Einzugsgebiete in der Schweiz wurden erfolgreich kalibriert und zeigen eine zufriedenstellende Modellgüte. Das Modell wurde anschliessend mit den hochaufgelösten neuen Klimaszenarien für die Schweiz CH2018 gespeist. Als Resultat stehen tägliche Abflusssimulationen für die Periode 1981-2099 für eine grosse Auswahl von Klimamodellen und verschiedene Emissionsszenarien zur Verfügung.

Im Allgemeinen muss für die Schweiz mit einer Zunahme des Winterabflusses und einer Abnahme des Sommerabflusses gerechnet werden. Die Intensität der Veränderungen ist in höher gelegenen Einzugsgebieten ausgeprägter. Besonders im Sommer, wenn Schnee- und Gletscherschmelze eine wichtige Rolle bei der Abflussbildung spielen, werden vergletscherte Einzugsgebiete aufgrund des Rückzugs der Gletscher mit einem starken Rückgang des Abflusses konfrontiert sein. In Einzugsgebieten, die von Niederschlägen dominiert werden, sind die Veränderungen im Sommer und Winter ebenfalls klar ersichtlich, jedoch ist die relative Änderung weniger stark ausgeprägt. Während die alpinen Einzugsgebiete aufgrund der früher einsetzenden Schneeschmelze einen zunehmenden Frühlingsabfluss aufweisen, zeigen die pluvialen Einzugsgebiete einen abnehmenden Frühlingsabfluss. Ein Rückgang des Abflusses wird auch im Herbst sowie im Jahresmittel erwartet. Diese saisonalen Muster verstärken sich, je höher die Emissionen und somit die Erwärmung der Atmosphäre ausfallen.

Die Resultate für Niedrigwasser zeigen, dass in den alpinen Einzugsgebieten die Wassermenge bei Niedrigwassersituationen grösser ausfallen wird. Dies kann mehrheitlich auf den verstärkten Winterabfluss zurückgeführt werden. In tiefer gelegenen Gebieten nimmt die Wassermenge bei Niedrigwasser deutlich ab (teils um mehr als die Hälfte). Auch die Saisonalität der Niedrigwassersituationen kann sich je nach Gebiet verschieben. Die Resultate bei moderaten Hochwassern sind weniger klar. Allgemein nehmen die Abflussspitzen in vergletscherten oder stark schneebeeinflussten Gebieten ab, da weniger Schmelzwasser vorhanden ist. In den pluvialen Gebieten ist entweder keine Änderung oder eine leichte Zunahme zu verzeichnen.

Die Verstärkung der Veränderungen durch die globale Erwärmung unterstreicht die Bedeutung der Mitigation an den Klimawandel. Durch konsequenten Klimaschutz können die Auswirkungen des Klimawandels erheblich verringert oder sogar vermieden werden. Die starke Abnahme des sommerlichen Abflusses in vergletscherten Einzugsgebieten kann zwar stark gedämpft, aber nicht vermieden werden, da der Gletscherrückgang auch mit konsequentem Klimaschutz nicht vollständig verhindert werden kann.

VERÖFFENTLICHUNGEN

Die Ergebnisse dieses Projektes «Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz» wurden bereits in mehreren Publikationen veröffentlicht oder werden noch veröffentlicht:

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., and Martius, O.: Hydro-CH2018-Runoff ensemble (version v1), Zenodo, <http://doi.org/10.5281/zenodo.3937485>, 2020a.

Muelchi, R., Roessler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., O. Martius (2020b): An ensemble of daily simulated runoff data (1981–2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble). Geoscientific Model Development, under review.

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., and Martius, O. (2020c): Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., <https://doi.org/10.5194/hess-2020-516>, in review.

Muelchi R., O. Rössler, J. Schwanbeck, R. Weingartner, O. Martius (2020d): Moderate runoff extremes in Swiss rivers and their seasonal occurrence in a changing climate. HESSD, in preparation.

DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) für den Auftrag und die Finanzierung dieses Projektes bedanken, das als Teil des Dissertationsprojektes von Regula Mülchi am Geographischen Institut sowie am Oeschger Centre for Climate Change Research der Universität Bern durchgeführt wurde. Weiter danken wir der Schweizerischen Mobiliar, welche im Rahmen ihres Gesellschaftsengagements ebenfalls Teile der Dissertation von Regula Mülchi finanziert hat. Wir danken dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz für die Bereitstellung der flächendeckenden und hoch aufgelösten Klimaszenarien CH2018. Ein grosser Dank geht auch an Harry Zekollari für die Gletscherszenarien für die Schweiz. Ausserdem möchten wir uns beim BAFU, bei der MeteoSchweiz und dem EU Copernicus Programm für die Bereitstellung von Grundlagen- und Messdaten bedanken. Die hydrologischen Simulationen wurden auf dem HPC Cluster UBELIX der Universität Bern gerechnet (<http://www.id.unibe.ch/hpc>).

LITERATUR

Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., and Seibert, J.: Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments, *Water Resour. Res.*, 50, 7541-7562, <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>, 2014.

BAFU (Hrsg.) 2021: Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2016: XX S.

CH2014-Impacts: Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp., 2014.

CH2018: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, Switzerland, 271 pp., 2018.

Doherty, J.: PEST: model independent parameter estimation, User Manual, Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia, 2005.

FOEN: Hydrological Data Service for watercourses and lakes, available at: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/water/state/data/obtaining-monitoring-data-on-the-topic-of-water/hydrological-data-service-for-watercourses-and-lakes.html> (last access: 15 August 2019), 2019.

Frei, C., and Schär, C.: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations, *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19980630\)18:8<873::AID-JOC255>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19980630)18:8<873::AID-JOC255>3.0.CO;2-9), 1998.

Frei, C.: Interpolation of temperature in a mountainous region using non-linear profiles and non-euclidean distances, *Int. J. Climatol.*, 34, 1585-1605, [10.1002/joc.3786](https://doi.org/10.1002/joc.3786), 2014.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *J. Hydrol.*, 377, 80–91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>, 2009.

Hamon, W. R.: Estimating potential evapotranspiration, *J. Hydr. Eng. Div.-ASCE*, 87, 107–120, 1961.

Horton, P., Schaefli, B., Mezghani, A., Hingray, B., and Musy, A.: Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty, *Hydrol. Process.*, 20, 2091–2109, <https://doi.org/10.1002/hyp.6197>, 2006.

Köplin, N., Schädler, B., Viviroli, D., and Weingartner, R.: Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 7, 2267-2283, <https://doi.org/10.5194/hess-16-2267-2012>, 2012.

Köplin, N., Rössler, O., Schädler, B., and Weingartner, R.: Robust estimates of climate-induced hydrological change in a temperate mountainous region, *Climatic Change*, 122, 171-184, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1015-x>, 2014.

MeteoSwiss: TabsD - Daily mean temperature (1961 – present), available at: <https://www.meteoswiss.admin.ch/home/climate/swiss-climate-in-detail/raeumliche-klimaanalysen.html> (last access: 15 August 2019), 2019a.

MeteoSwiss: RhiresD - Daily precipitation (final analysis, 1961 – last month), available at: <https://www.meteoswiss.admin.ch/home/climate/swiss-climate-in-detail/raeumliche-klimaanalysen.html> (last access: 15 August 2019), 2019b.

Milano, M., Reynard, E., Köplin, N., and Weingartner, R.: Climatic and anthropogenic changes in Western Switzerland: Impacts on water stress, *Sci. Total Environ.*, 536, 12-24, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.049>, 2015.

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., and Martius, O.: Hydro-CH2018-Runoff ensemble (version v1), Zenodo, <http://doi.org/10.5281/zenodo.3937485>, 2020a.

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., O. Martius: An ensemble of daily simulated runoff data (1981–2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble). *Geoscientific Model Development*, 2020b in review.

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., and Martius, O. (2020c): Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2020-516>, 2020c in review.

Muelchi R., O. Rössler, J. Schwanbeck, R. Weingartner, O. Martius: Moderate runoff extremes in Swiss rivers and their seasonal occurrence in a changing climate. *HESSD*, 2020d in preparation.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282–290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6), 1970.

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., and Weingartner, R.: An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre and post-processing-tools, *Environ. Model. Softw.*, 24, 1209–1222, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.04.001>, 2009.

Weingartner, R.: Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten Jahrzehnten. Synthesebericht zum Projekt Hydro-CH2018, Bundesamt für Umwelt, Bern, Schweiz, 2019.

Zekollari, H., Huss, M., and Farinotti, D.: Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EUROCORDEX RCM ensemble, *The Cryosphere*, 13, 1125–1146, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>, 2019.

ANHANG

Tabelle A1: Liste der erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete und deren Gebietscharakteristiken

Fluss	Ort	Fläche [km ²]	mittlere Gebietshöhe [m ü. M.]	Vergletscherungsgrad [%]	Kalibrierungsstart	Kalibrierungsende
Aach	Salmsach	47.4	476	0	1984	2014
Albula	Tiefencastel	529	2127	1	1984	2014
Allenbach	Adelboden	28.8	1855	0	1984	2014
Alp	Einsiedeln	46.7	1161	0	1992	2014
Alpbach	Erstfeld	20.7	2181	23	1984	2014
Areuse	Boudry	377.7	1084	0	1984	2014
Berninabach	Pontresina	106.9	2608	17	1984	2014
Biber	Biberbrugg	31.9	1008	0	1990	2014
Birs	Muenchenstein	887.3	733	0	1984	2014
Birse	Moutier	185.8	927	0	1984	2014
Birse	Soyhieres	569.5	811	0	1984	2014
Broye	Payerne	415.9	724	0	1984	2014
Calancasca	Buseno	120.5	1930	1	1984	2014
Cassarate	Pregassona	75.8	991	0	1984	2014
Doubs	Ocourt	1275.4	960	0	1984	2014
Doubs	Combe des Sarrasins	998.5	985	0	1984	2014
Doubs	Le Noirmont	1046.7	985	0	1984	2014
Duennern	Olten	233.8	714	0	1984	2014
Emme	Emmenmatt	443	1072	0	1984	2014
Emme	Wiler	924.1	871	0	1984	2014
Emme	Eggiwil	124.4	1283	0	1984	2014
Engelberger Aa	Buochs	228	1605	3	1984	2014
Ergolz	Liestal	261.2	591	0	1984	2014
Glatt	Herisau	16.7	836	0	1984	2014
Glatt	Rheinsfelden	417.4	506	0	1984	2014

Glenner	Castrisch	380.9	2014	2	1989	2014
Goldach	Goldach	50.4	840	0	1984	2014
Goneri	Oberwald	38.4	2378	10	1991	2014
Grande Eau	Aigle	131.6	1566	2	1984	2014
Grosstalbach	Isenthal	43.9	1810	8	1984	2014
Guerbe	Belp	116.1	849	0	1984	2014
Ilfis	Langnau	187.4	1047	0	1990	2014
Kander	Hondrich	490.7	1846	7	1984	2014
Kleine Emme	Emmen	478.3	1058	0	1984	2014
Kleine Emme	Werthenstein	311.5	1171	0	1985	2014
Landwasser	Davos	183.7	2223	0	1984	2014
Langeten	Huttwil	59.9	765	0	1984	2014
Linth	Weesen	1061.5	1580	2	1984	2014
Linth	Mollis	600.2	1737	3	1984	2014
Lorze	Zug	100.2	822	0	1984	2014
Luthern	Nebikon	104.7	754	0	1988	2014
Maggia	Locarno	926.9	1534	0	1985	2014
Magliasina	Magliaso	34.4	927	0	1984	2014
Mentue	Yvonand	105.3	683	0	1984	2014
Minster	Euthal	59.1	1352	0	1984	2014
Moesa	Lumino	471.9	1668	0	1984	2014
Muota	Ingenbohl	316.6	1364	0	1984	2014
Murg	Waengi	80.1	654	0	1984	2014
Murg	Frauenfeld	213.3	596	0	1984	2014
Murg	Murgenthal	183.4	659	0	1984	2014
Necker	Mogelsberg	88.1	962	0	1984	2014
Ova da Cluozza	Zernez	26.9	2361	0	1984	2014
Ova dal Fuorn	Zernez	55.3	2333	0	1984	2014
Plessur	Chur	264.4	1865	0	1984	2014
Poschiavino	Le Prese	167.7	2161	6	1984	2014
Poschiavino	La Roesa	14.1	2286	0	1984	2014
Promenthouse	Gland	119.8	1035	0	1986	2014
Reuss	Seedorf	833.2	2005	8	1984	2014
Reuss	Andermatt	190.2	2276	4	1984	2014

Rhone	Reckingen	214.3	2301	16	1984	2014
Riale di Calneggia	Caveragno	23.9	1982	0	1984	2014
Riale di Pincascia	Lavertezzo	44.5	1713	0	1993	2014
Rom	Muestair	128.5	2188	0	1995	2014
Rosegbach	Pontresina	66.5	2701	29	1984	2014
Saltina	Brig	76.5	2017	4	1984	2014
Sarine	Broc	636.3	1501	0	1984	2014
Schaechen	Buerglen	107.9	1722	2	1986	2014
Scheulte	Vicques	72.7	797	0	1992	2014
Seez	Mels	106.1	1796	0	1984	2014
Sense	Thoerishaus	351.2	1076	0	1984	2014
Sihl	Zuerich	342.6	1047	0	1984	2014
Simme	Oberwil	343.7	1639	3	1984	2014
Simme	Oberried	34.7	2335	26	1984	2014
Sionge	Vuippens	43.4	872	0	1984	2014
Sionne	Sion	27.6	1575	0	2007	2014
Sitter	Appenzell	74.4	1254	0	1984	2014
Sitter	St. Gallen	261.1	1045	0	1984	2014
Sorne	Delemont	213.9	785	0	1984	2014
Suze	Sonceboz	127.2	1044	0	1984	2014
Thur	Andelfingen	1701.6	773	0	1984	2014
Thur	Halden	1085	914	0	1984	2014
Thur	Jonschwil	492.9	1027	0	1984	2014
Ticino	Bellinzona	1517.5	1679	0	1984	2014
Ticino	Pollegio	443.8	1794	0	1987	2014
Toess	Neftenbach	343.3	659	0	1984	2014
Tresa	Ponte Tresa	609.1	805	0	1984	2014
Vedeggio	Agno	99.9	921	0	2004	2014
Venoge	Ecublens	227.6	694	0	1984	2014
Verzasca	Lavertezzo	185.1	1663	0	1990	2014
Veveyse	Vevey	64.5	1108	0	1984	2014
Vorderrhein	Ilanz	774	2026	2	1984	2014
Wigger	Zofingen	366.2	662	0	1984	2014
Worble	Ittigen	67.1	678	0	1989	2014

Tabelle A2: Liste der zu kalibrierenden freien Modellparameter für PREVAH.

Abbreviation	Description	Unit
RAINC	Precipitation adjustment	%
SNOWC	Snow adjustment	%
TOM	Threshold temperature for rain-snow	°C
TMFSNOW	Temperature melt factor for snowmelt	mm d ⁻¹ K ⁻¹
RMFSNOW	Radiation melt factor for snow	mm h ⁻¹ K ⁻¹ W ⁻¹ m ²
BETA	Non-linearity parameter for infiltration	-
SGR	Threshold for quick runoff formation	mm
K0H	Storage time for surface runoff	h
K1H	Storage time for interflow	h
K2H	Storage time for slow base flow	h
CG1H	Storage time for quick base flow	h
SLZ1MAX	Maximum content of quick base flow storage	mm
PERC	Percolation rate	mm h ⁻¹
<i>CICEMF</i>	Temperature melt factor for ice	mm d ⁻¹ K ⁻¹
<i>CAICE</i>	Radiation melt factor for ice	mm h ⁻¹ K ⁻¹ W ⁻¹ m ²

Tabelle A3: Liste der für den Vergleich der Simulationen der UBE, UZH, WSL verwendeten Klimamodellketten.

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E		X	X
	DMI-HIRMAM5	X	X	X
	CLMcom-CCLM4-8-17			
	CLMcom-CCLM5-0-6			X
	SMHI-RCA4	X	X	X
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17			
	CLMcom-CCLM5-0-6			X
	ICTP-RegCM4-3			
	KNMI-RACMO22E	X	X	X
	SMHI-RCA4	X	X	X
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17			
	CLMcom-CCLM5-0-6			X
	MPI-CSC-REMO2009-1			
	SMHI-RCA4	X	X	X
	MPI-CSC-REMO2009-2			
MIROC-MIROC5	CLMcom-CCLM5-0-6			X
	SMHI-RCA4	X	X	X
CCCma-CanESM2	SMHI-RCA4		X	X
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	SMHI-RCA4			
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4			
NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4	X	X	X
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	SMHI-RCA4			

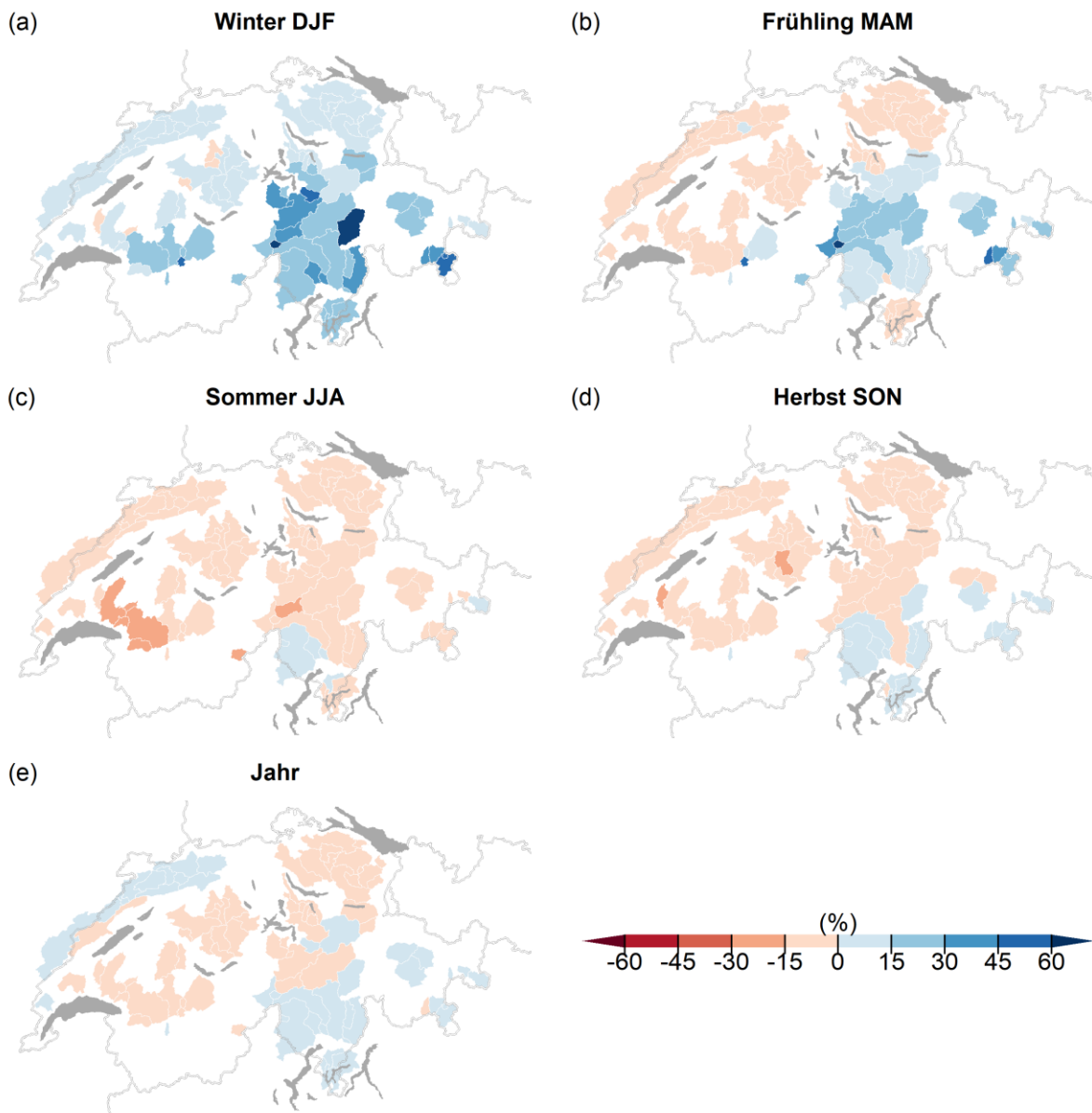


Abbildung A1: Prozentuale Veränderung des mittleren saisonalen und jährlichen Abflusses für den Zeitraum **2045-2074** gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios **RCP2.6** für Winter (a), Frühling (b), Sommer (c), Herbst (d) und das ganze Jahr (e) ab. Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

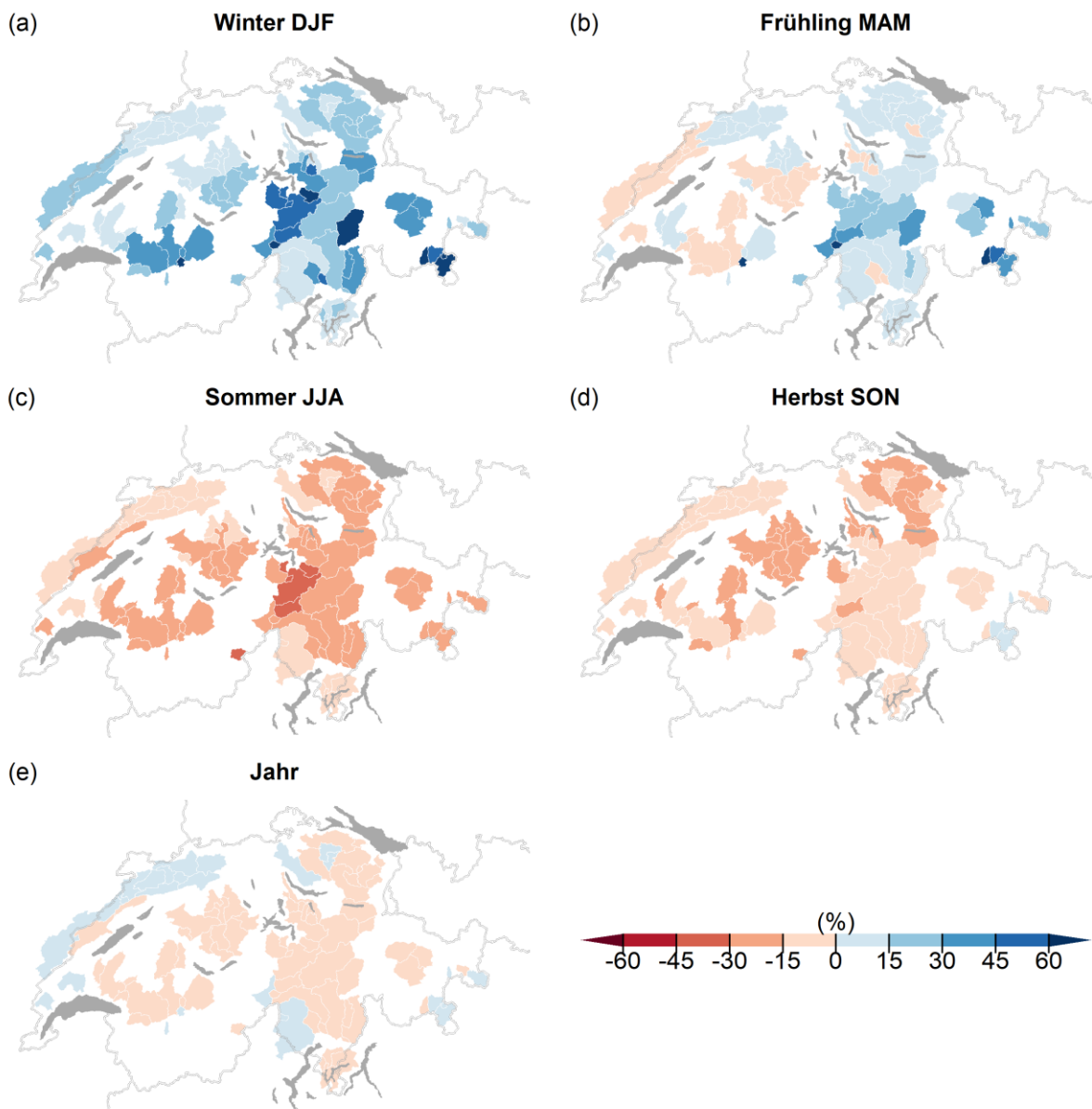


Abbildung A2: Prozentuale Veränderung des mittleren saisonalen und jährlichen Abflusses für den Zeitraum **2045-2074** gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios **RCP8.5** für Winter (a), Frühling (b), Sommer (c), Herbst (d) und das ganze Jahr (e) ab. Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

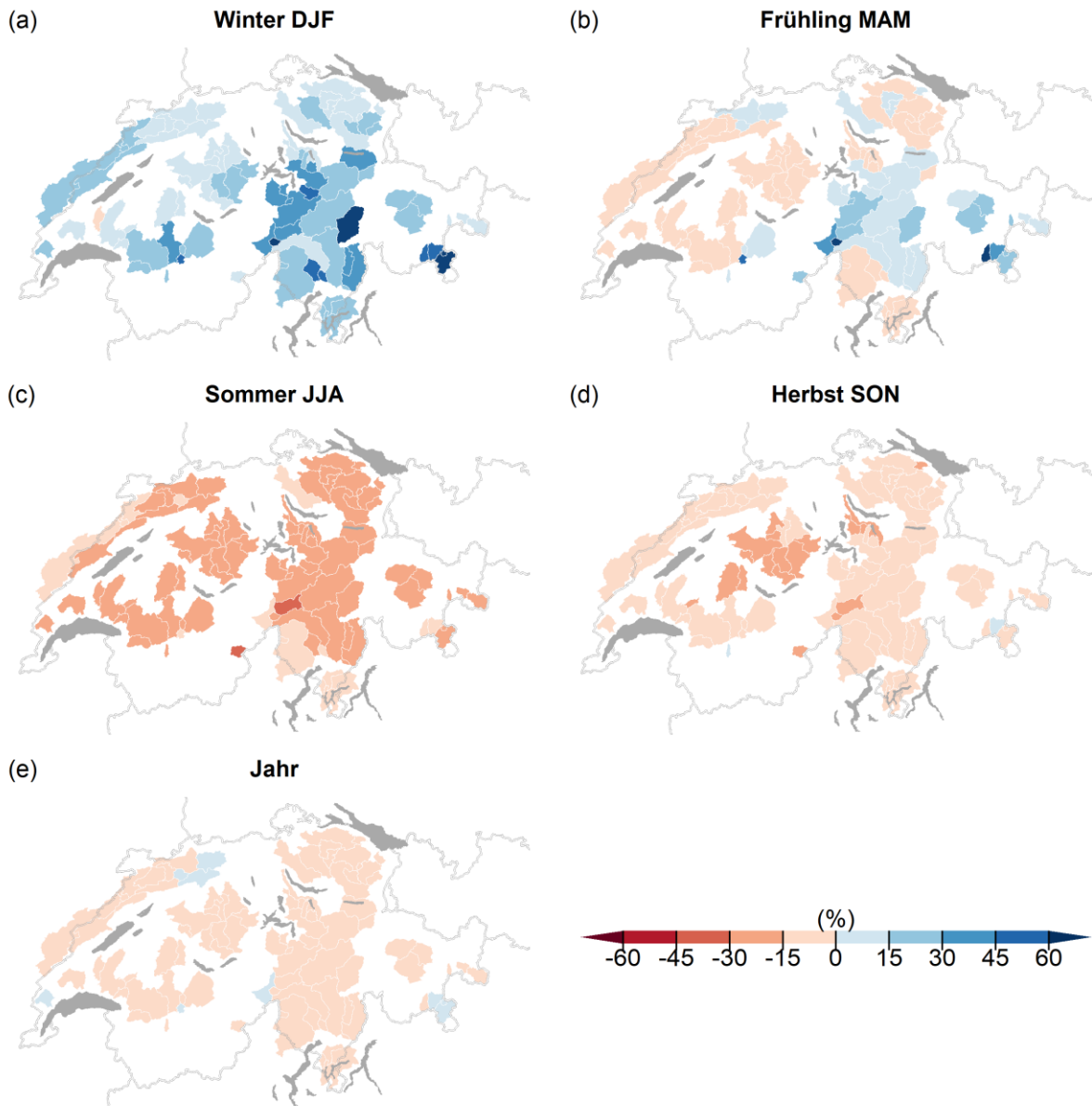


Abbildung A3: Prozentuale Veränderung des mittleren saisonalen und jährlichen Abflusses für den Zeitraum **2045-2074** gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios **RCP4.5** für Winter (a), Frühling (b), Sommer (c), Herbst (d) und das ganze Jahr (e) ab. Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

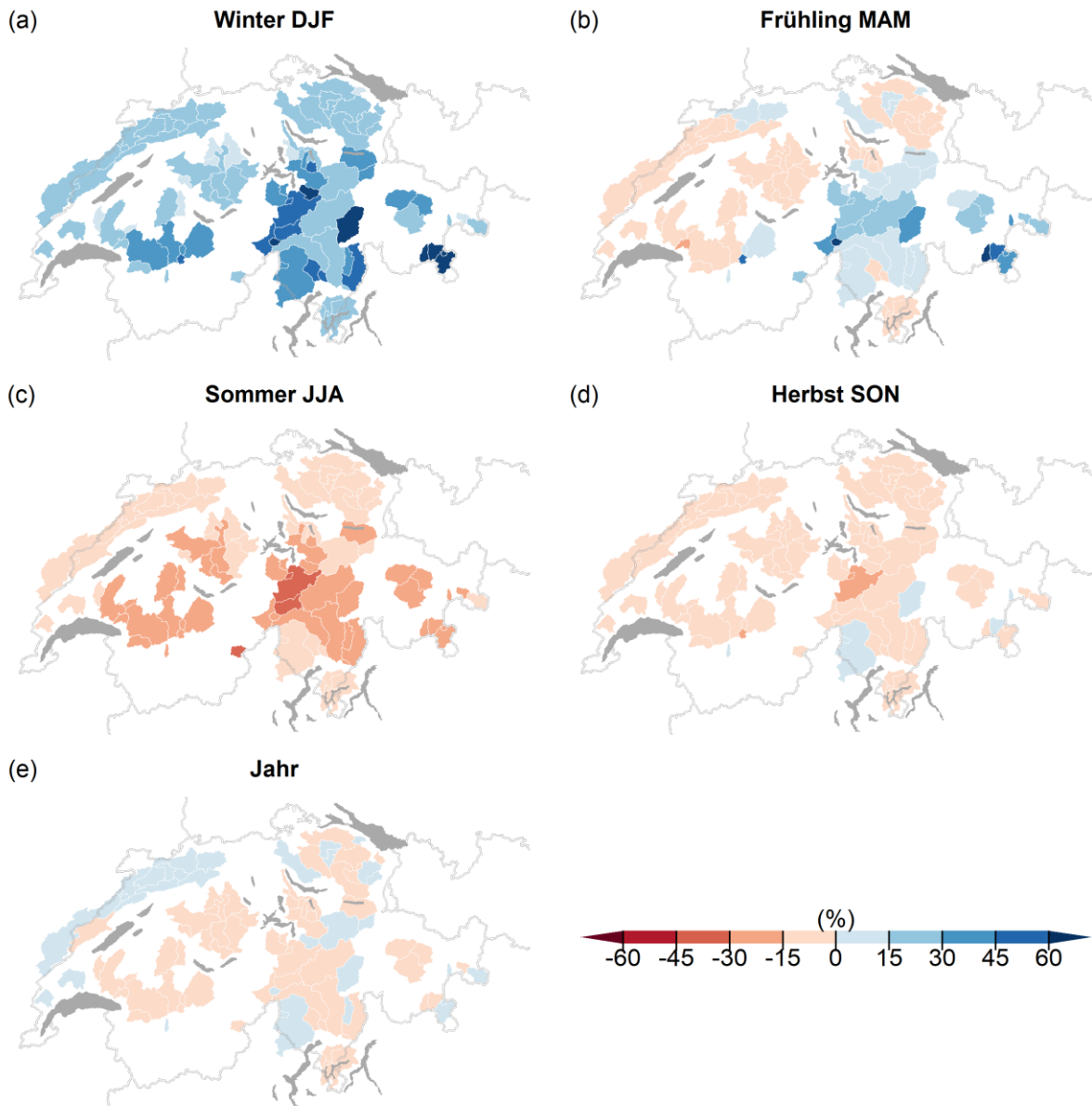


Abbildung A4: Prozentuale Veränderung des mittleren saisonalen und jährlichen Abflusses für den Zeitraum **2070-2099** gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median des Szenarios **RCP4.5** für Winter (a), Frühling (b), Sommer (c), Herbst (d) und das ganze Jahr (e) ab. Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

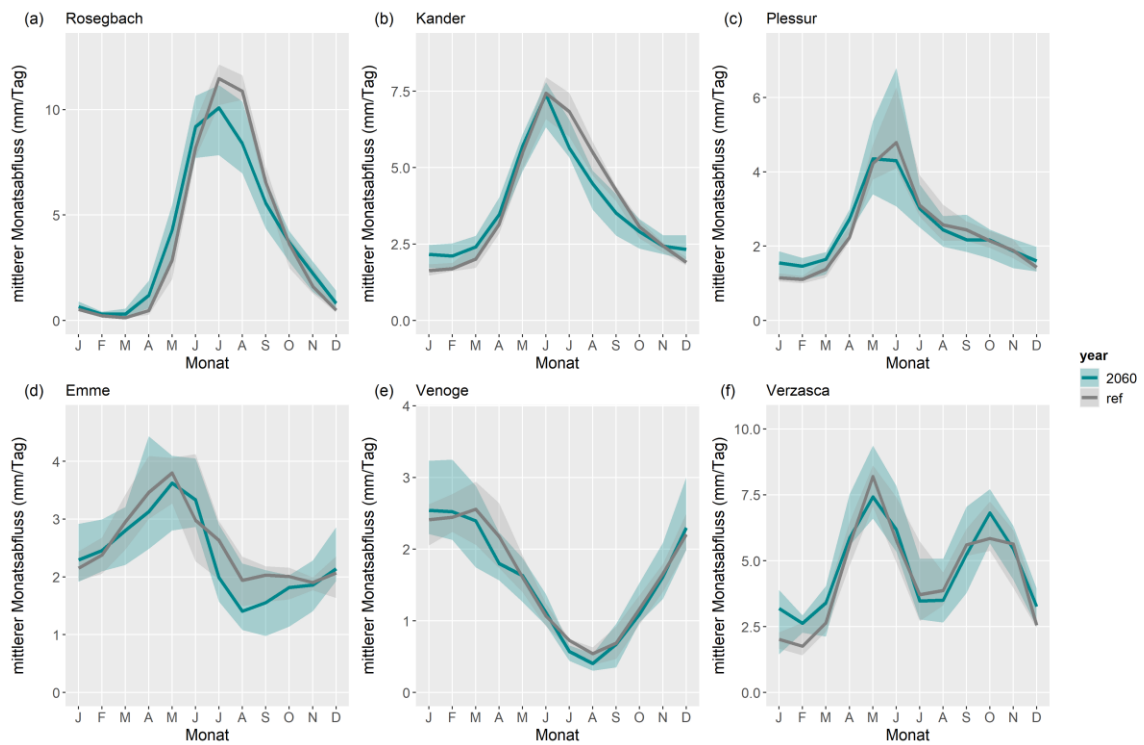


Abbildung A5: Abflussregime der repräsentativen Einzugsgebiete in der Referenzperiode (ref, grau) und für die Periode **2045-2074** für das Szenario **RCP2.6**. Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum).
Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

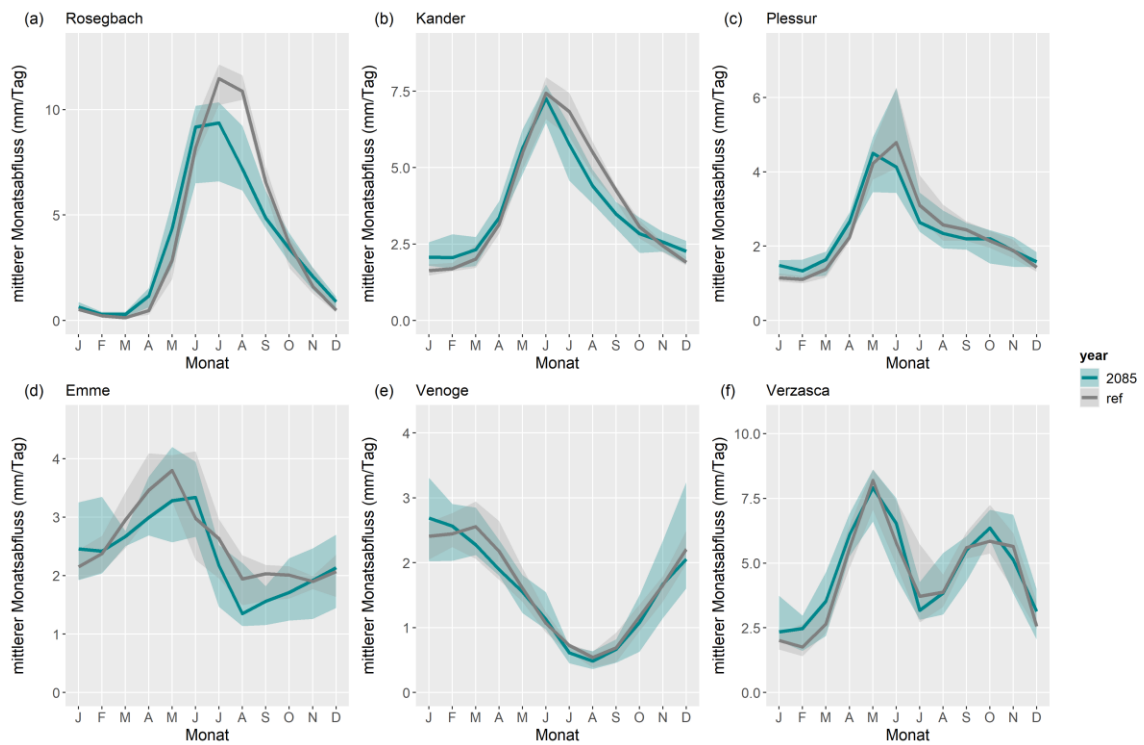


Abbildung A6: Abflussregime der repräsentativen Einzugsgebiete in der Referenzperiode (ref, grau) und für die Periode **2070-2099** für das Szenario **RCP2.6**. Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum).
Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

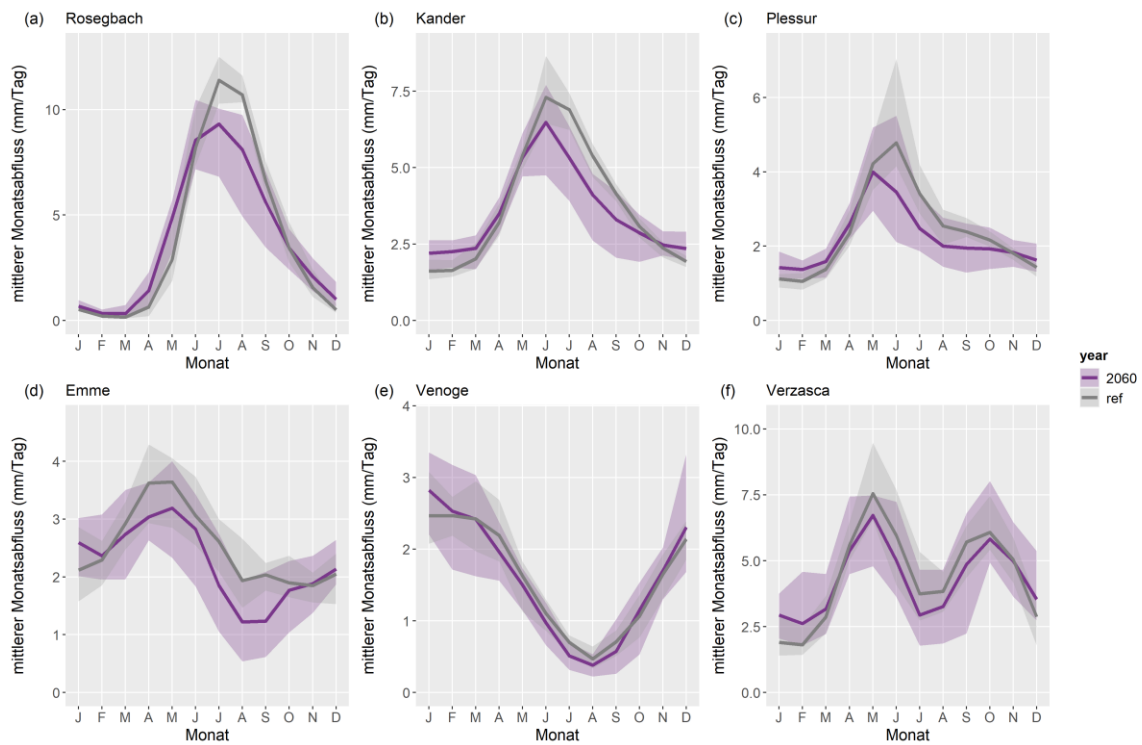


Abbildung A7: Abflussregime der repräsentativen Einzugsgebiete in der Referenzperiode (ref, grau) und für die Periode **2045-2074** für das Szenario **RCP4.5**. Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum).
Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

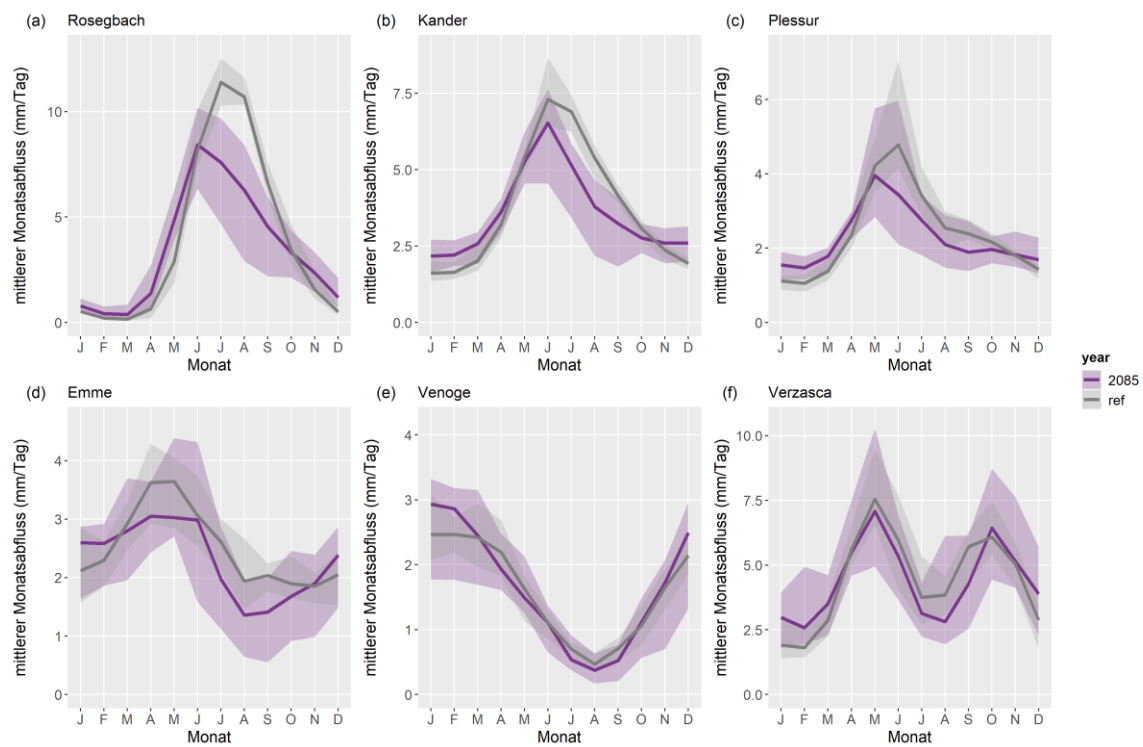


Abbildung A8: Abflussregime der repräsentativen Einzugsgebiete in der Referenzperiode (ref, grau) und für die Periode **2070-2099** für das Szenario **RCP4.5**. Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum).
Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

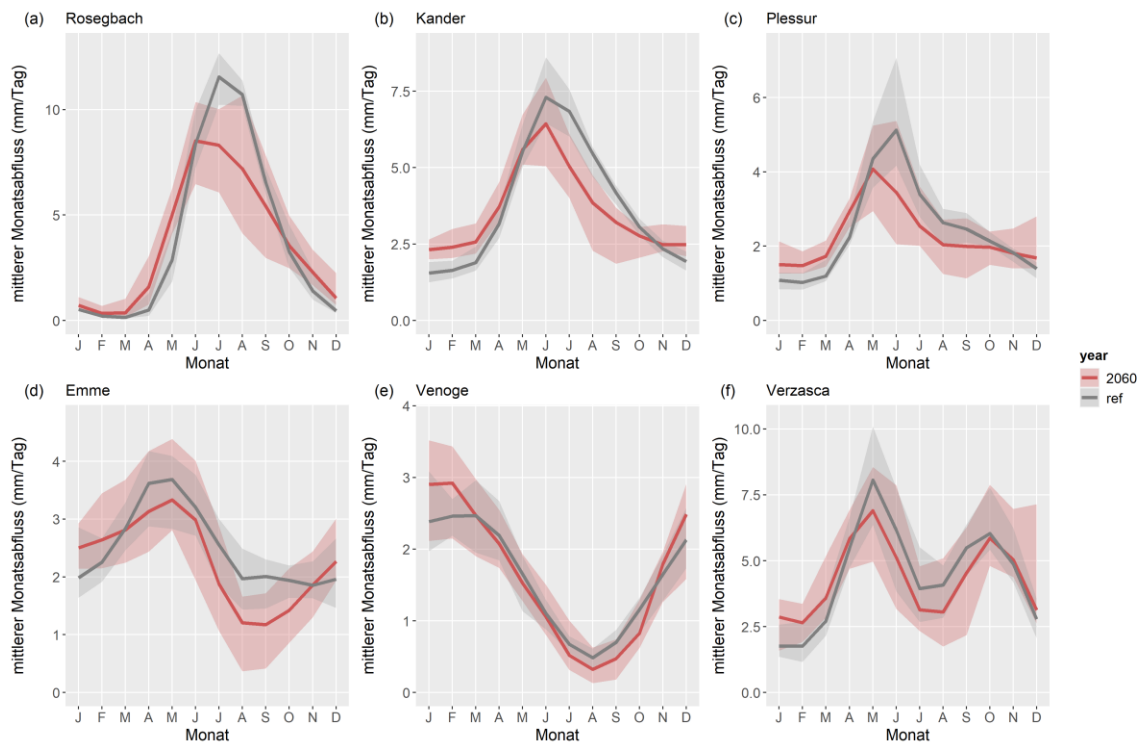


Abbildung A9: Abflussregime der repräsentativen Einzugsgebiete in der Referenzperiode (ref, grau) und für die Periode **2045-2074** für das Szenario **RCP8.5**. Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum).
Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

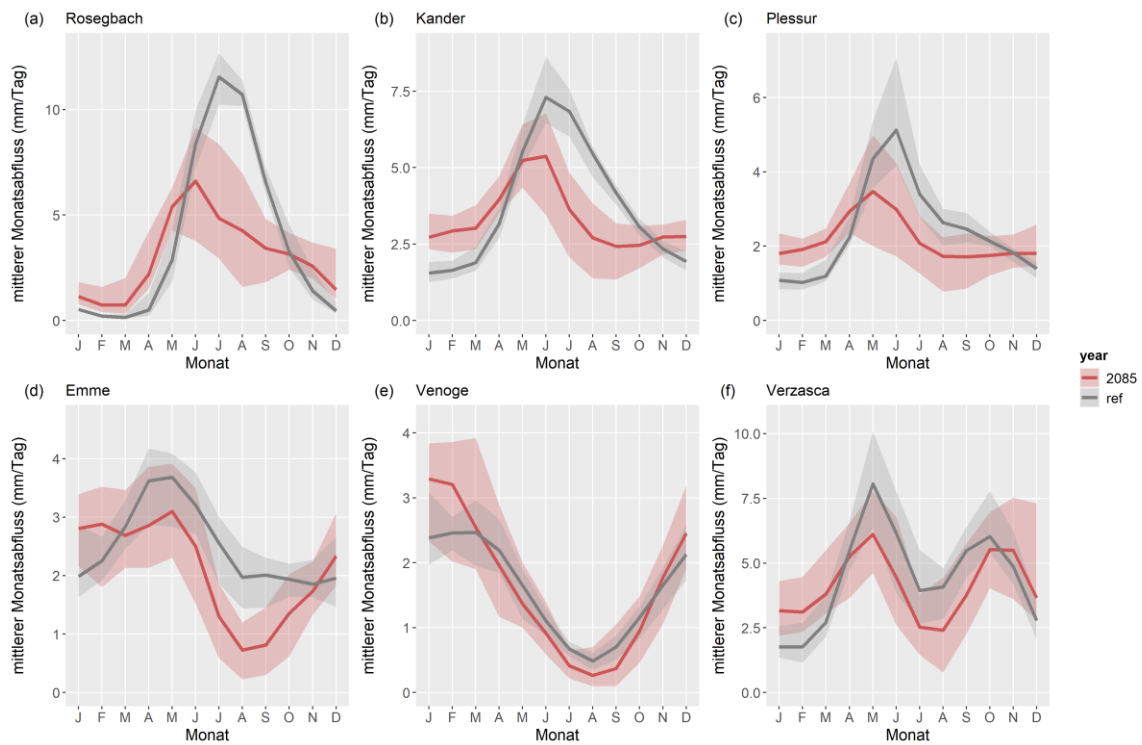


Abbildung A10: Abflussregime der repräsentativen Einzugsgebiete in der Referenzperiode (ref, grau) und für die Periode **2070-2099** für das Szenario **RCP8.5**. Die Unsicherheitsbänder zeigen die Variabilität der Modellketten an (Minimum und Maximum).
Abbildung nach Muelchi et al. (2020c).

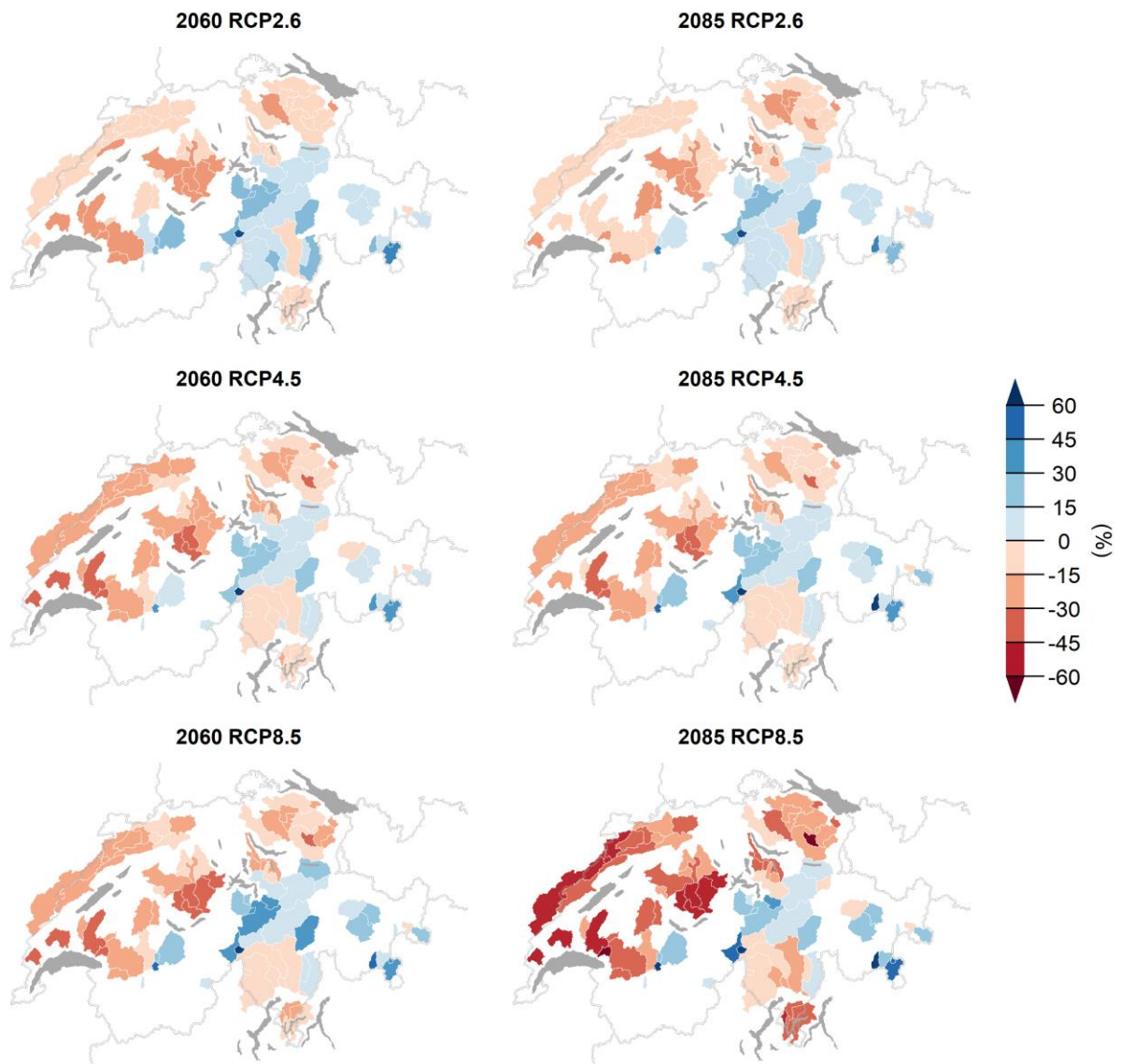


Abbildung A11: Prozentuale Veränderung des Niedrigwasserindikators NM7Q in der Periode 2045-2074 (links) und 2070-2099 (rechts) gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median der Szenarien RCP2.6 (oben), RCP4.5 (mitte) und RCP8.5 (unten). Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).

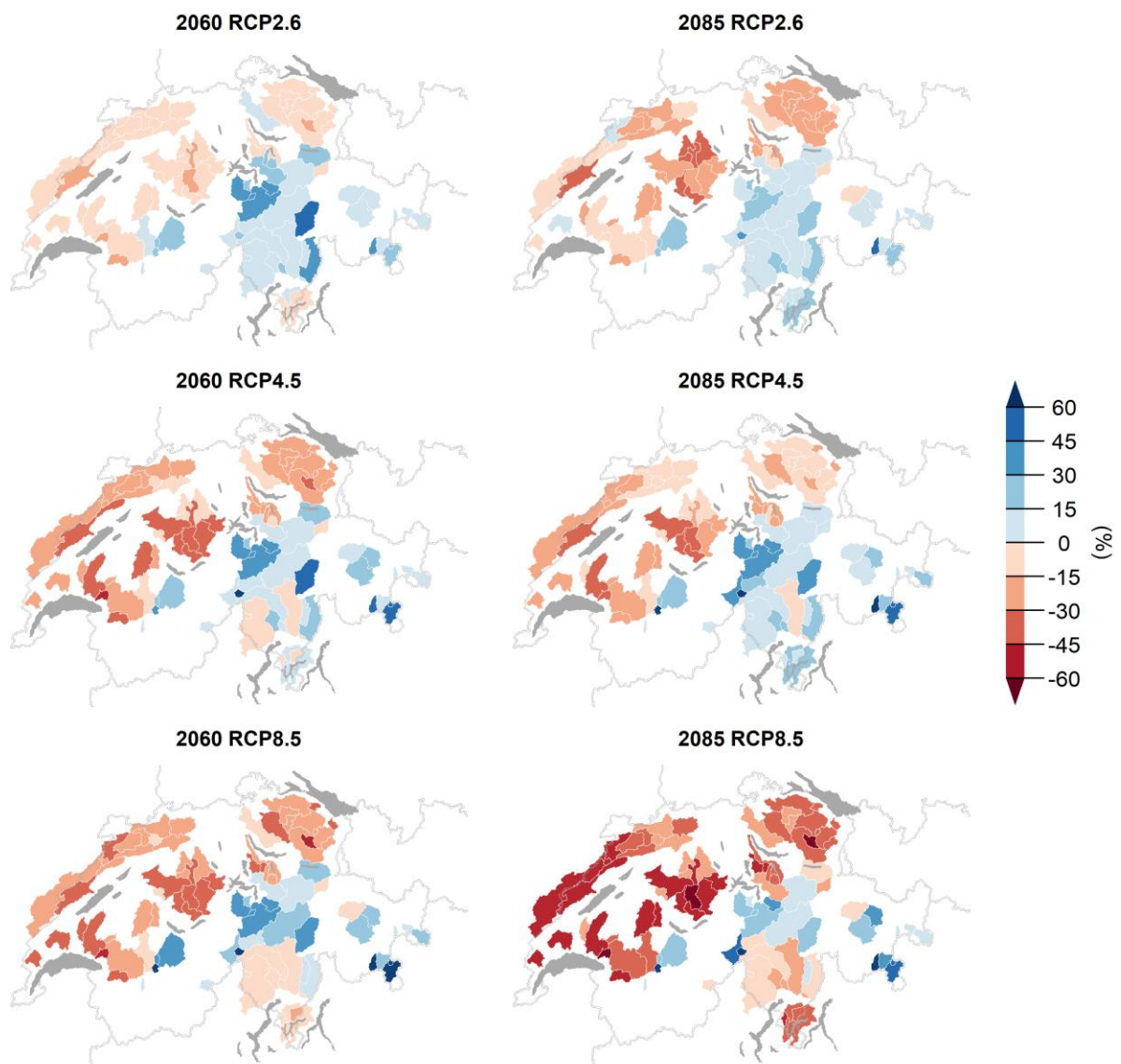


Abbildung A12: Prozentuale Veränderung des Niedrigwasserindikators Q347 in der Periode 2045-2074 (links) und 2070-2099 (rechts) gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. Die Veränderungen bilden den Median der Szenarien RCP2.6 (oben), RCP4.5 (mitte) und RCP8.5 (unten).

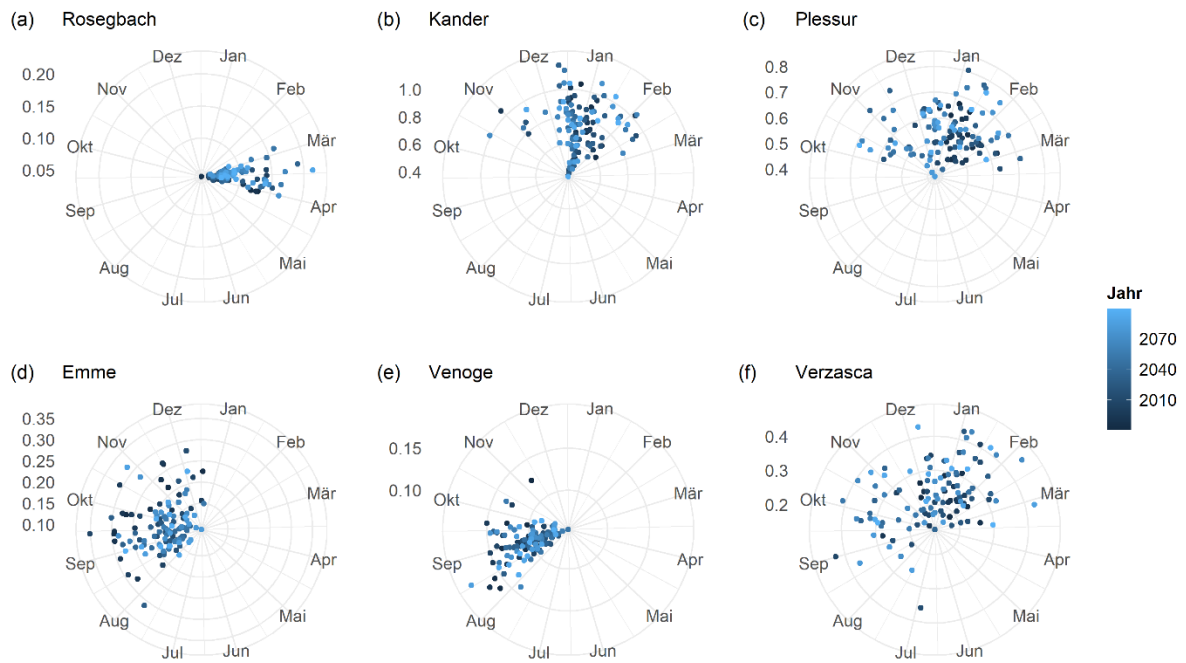


Abbildung A13: Entwicklung der Abflussmenge (Radius, mm/Tag) und des Auftretenszeitpunktes des Niedrigwasserindikators NM7Q für ausgewählte repräsentative Einzugsgebiete unter dem Szenario RCP2.6. Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).

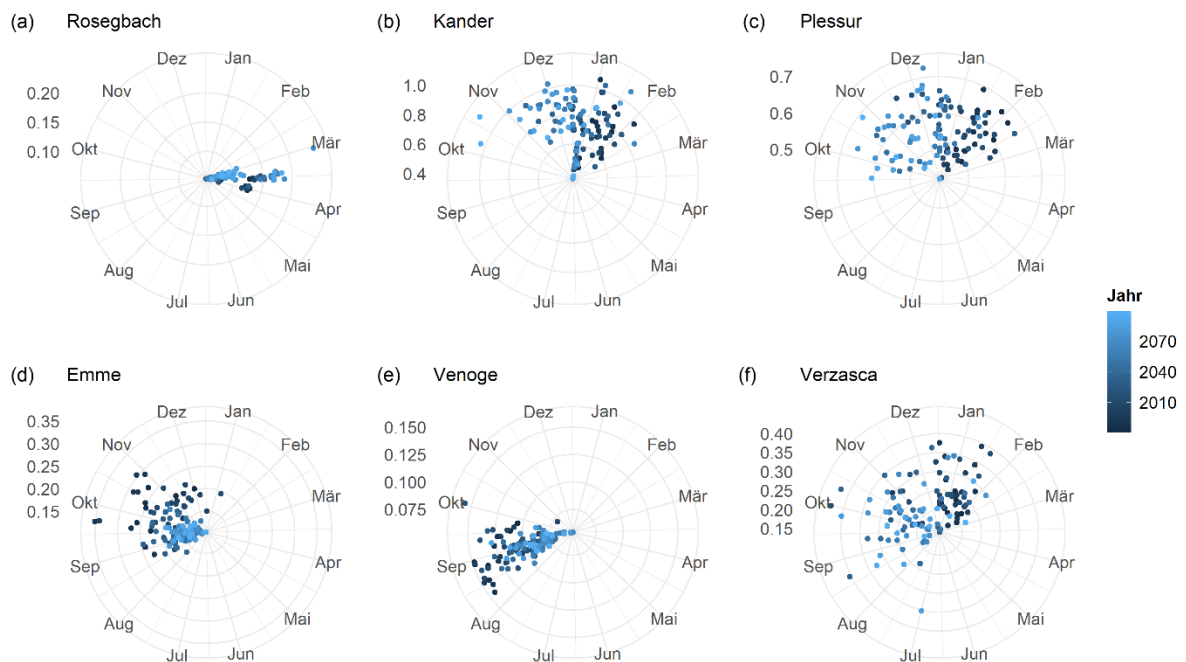


Abbildung A13: Entwicklung der Abflussmenge (Radius, mm/Tag) und des Auftretenszeitpunktes des Niedrigwasserindikators NM7Q für ausgewählte repräsentative Einzugsgebiete unter dem Szenario RCP4.5. Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).

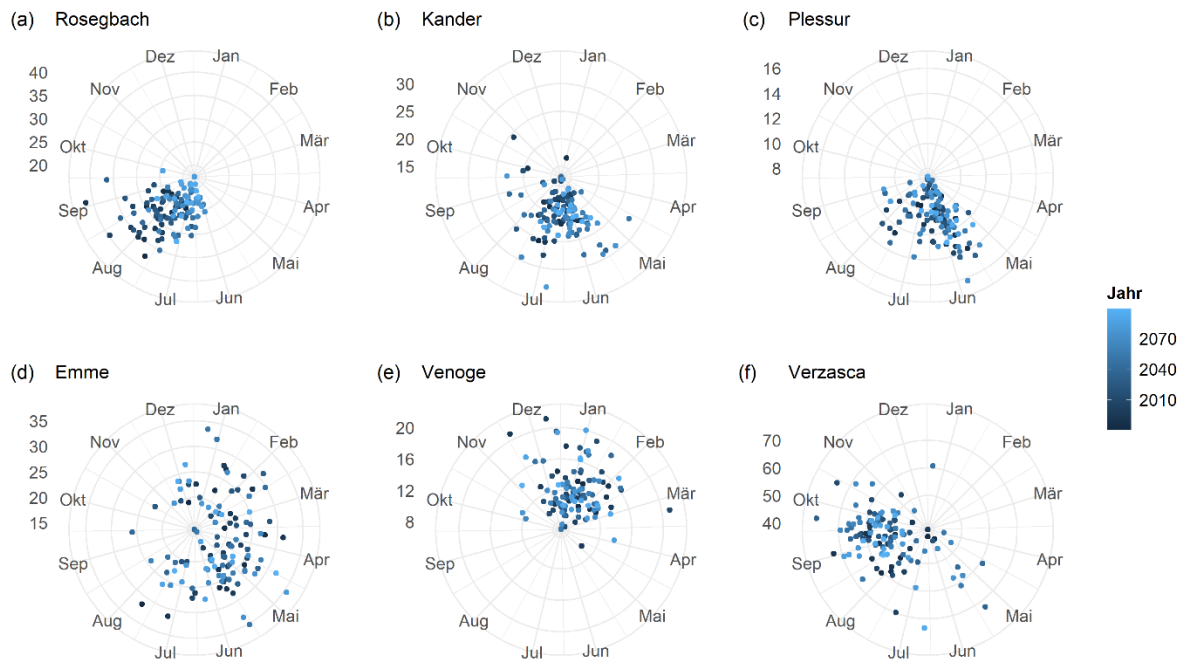


Abbildung A15: Entwicklung der Abflussmenge (Radius, mm/Tag) und des Auftretenszeitpunktes des jährlichen Tagesabflussmaximums für ausgewählte repräsentative Einzugsgebiete unter dem Szenario RCP2.6. Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).

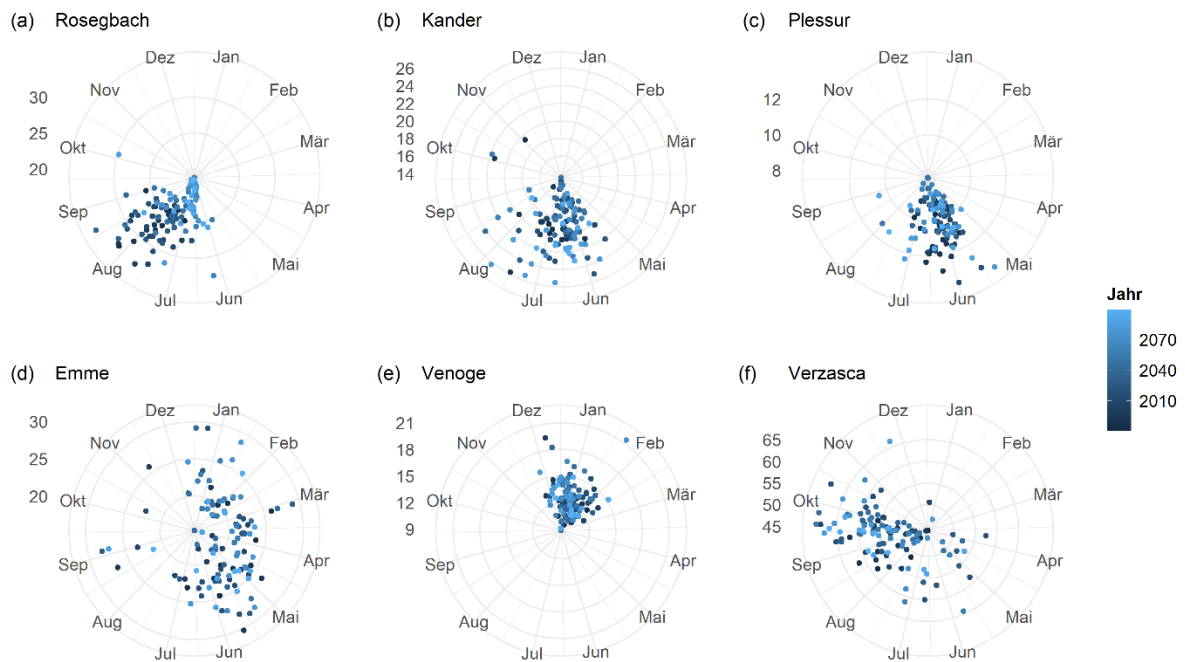


Abbildung A16: Entwicklung der Abflussmenge (Radius, mm/Tag) und des Auftretenszeitpunktes des jährlichen Tagesabflussmaximums für ausgewählte repräsentative Einzugsgebiete unter dem Szenario RCP4.5. Abbildung nach Muelchi et al. (2020d).